



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga"



Autor: Mayare de Souza Moura Maciel Machado

Orientador: Fernando Soares Lameiras

Coorientadora: Ana Maria Matildes dos Santos



Maio de 2018



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Mayare de Souza Moura Maciel Machado

“Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais.

Orientador: Fernando Soares Lameiras

Coorientadora: Ana Maria Matildes dos Santos

Ouro Preto, maio de 2018

M149b Machado, Mayare de Souza Moura Maciel.
 Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga [manuscrito] / Mayare de Souza Moura Maciel Machado. - 2018.
 xi, 75f.: il.: color; grafs; tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Fernando Soares Lameiras.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.

 Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

 1. Rejeitos. 2. Blocos. 3. Construção civil. 4. Fundente. 5. Tratamento térmico. I. Lameiras, Fernando Soares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 620



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS UFOP - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



"Blocos para Construção Civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga"

Autora: Mayare de Souza Moura Maciel Machado

Dissertação defendida e aprovada, em 28 de maio de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Fernando Soares Lameiras (Doutor) - Orientador
CDTN-Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear/REDEMAT

Prof. Eduardo Henrique Martins Nunes (Doutor)
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Cláudio Batista Vieira (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto

Profª Ana Maria Matildes dos Santos (Doutora) - Coorientadora
CDTN-Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE NOTAÇÕES	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
3.1 TTAC	8
3.2 FUNDAÇÃO RENOVA	9
3.3 REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	12
3.4 MATERIAIS CERÂMICOS.....	20
3.5 TIJOLO MACIÇO CERÂMICO	21
3.6 LADRILHO HIDRÁULICO.....	22
4 METODOLOGIA	24
4.1 MATERIAIS	24
4.2 OBTENÇÃO DOS BLOCOS	25
4.3 TESTES PRELIMINARES.....	28
4.4 TESTES INTERMEDIÁRIOS.....	29
4.5 TESTES FINAIS.....	31
4.6 CARACTERIZAÇÕES.....	31

4.6.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	31
4.6.2	MICROSCOPIA ÓPTICA	32
4.6.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE RAIOS X.....	32
4.6.4	CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA	33
4.6.5	CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL E INSPEÇÃO VISUAL	33
4.6.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA	33
4.6.7	PERDA DE MASSA APÓS A IMERSÃO.....	34
4.6.8	DENSIDADE	35
4.6.9	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	35
4.6.10	RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	38
4.6.11	ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	TESTES PRELIMINARES.....	40
5.2	TESTES INTERMEDIÁRIOS.....	40
5.2.1	ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
5.2.2	DENSIDADE	43
5.2.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	45
5.2.4	DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS TESTES INTERMEDIÁRIOS	47
5.3	TESTES FINAIS.....	49
5.3.1	INSPEÇÃO VISUAL.....	49
5.3.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA	52
5.3.3	PERDA DE MASSA APÓS A IMERSÃO.....	56
5.3.4	DENSIDADE	57
5.3.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	58

5.3.6	RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	60
5.3.7	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	62
5.4	APLICAÇÕES PARA O PRODUTO OBTIDO COM O REJEITO	66
6	CONCLUSÕES.....	68
7	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aspecto do rejeito de Candonga após secagem ao sol e catação de matéria orgânica.	1
Figura 1.2 – Comparação das distribuições granulométricas da amostra de rejeito de Candonga e da areia natural com as faixas requeridas para utilização em concretos conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).	2
Figura 1.3 – Difratoograma do rejeito de Candonga.	2
Figura 1.4 – Micrografia do rejeito depositado na Barragem de Candonga: morfologia das partículas.	3
Figura 1.5 – Representação esquemática da reação das partículas de Na_2CO_3 com o quartzo (SiO_2) que forma um filme líquido, constituído de Na_2SiO_3 e $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, em torno das partículas de quartzo que promove a sua adesão com as partículas vizinhas.	4
Figura 1.6 – Micrografia óptica de uma seção polida de um monólito obtido com o rejeito de Candonga com adição de barrilha. A imagem inferior foi obtida com luz polarizada. As regiões mais claras são formadas por material vítreo, responsável pela aglomeração e resistência mecânica do material.	5
Figura 1.7 – Fotografia de uma pastilha obtida com amostra do rejeito de Candonga com adição de barrilha, por meio de prensagem e aquecimento a 950°C	6
Figura 3.1 – Custos realizados por programa até dezembro de 2016.	10
Figura 3.2 – Custos realizados por eixo temático até dezembro de 2016.	11
Figura 3.3 – Tijolos para a construção civil.	12
Figura 3.4 – Exemplos de diferentes padrões de ladrilho hidráulico.	22
Figura 4.1 – Preparação da amostra do rejeito da Barragem de Candonga.	25
Figura 4.2 – Sequência de etapas para a obtenção dos blocos.	26
Figura 4.3 – Fenômeno da eflorescência (manchas brancas) observado nos blocos aquecidos nas temperaturas de 600 e 650°C . Bloco prensado a 1,2MPa.	28
Figura 4.4 – Bloco prensado a 2,4MPa após o aquecimento.	29
Figura 4.5 – Bloco após tratamento térmico a 900°C e ensaio de compressão: exterior mais escuro (camada vítrea) e interior fragilizado.	30
Figura 4.6 – Blocos capeados com enxofre.	36
Figura 4.7 – Bloco inserido na prensa para ensaio de compressão.	36

Figura 4.8 – Prensa automática utilizada nos ensaios de compressão.	37
Figura 4.9 – Detalhe do corpo-de-prova inserido na prensa: cabeçote de compressão (veja seta superior) e apoio metálico (veja seta inferior).	37
Figura 4.10 – Máquina universal de ensaios mecânicos: bloco, aparelho metálico (veja seta inferior) e punção (veja seta superior) durante ensaio de flexão.....	38
Figura 5.1 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.1 para a absorção de água (%) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).42	
Figura 5.2 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.2 para a densidade (g/cm^3) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).	44
Figura 5.3 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.3 para a resistência à compressão (MPa) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).	46
Figura 5.4 – Seção transversal fraturada dos blocos: uma camada vítrea na região mais externa pode ser visualizada (veja seta superior), enquanto a região interna (veja seta inferior) não apresenta aspecto vítreo.	48
Figura 5.5 – Comparação entre dois difratogramas de raios X: da região central e da borda de um bloco tratado a 900°C	48
Figura 5.6 – Blocos tratados a 700°C com diferentes graus de eflorescência.....	50
Figura 5.7 – Bloco tratado a 700°C com presença de trincas.....	50
Figura 5.8 – Histograma mostrando a distribuição dos valores de absorção de água dos blocos dos testes finais.....	53
Figura 5.9 – Teste para normalidade para os valores de absorção de água dos blocos dos testes finais.	53
Figura 5.10 – Seção transversal típica dos blocos: camada externa mais escura e coesa (veja seta superior), no centro a camada é mais clara e menos coesa (veja seta inferior).....	54
Figura 5.11 – Histograma dos valores de densidade dos blocos dos testes finais.....	58
Figura 5.12 – Teste para normalidade para os valores de densidade dos blocos dos testes finais.	58
Figura 5.13 – Teste para normalidade para os valores de resistência à compressão dos blocos dos testes finais.....	60
Figura 5.14 – Histograma dos valores de resistência à compressão dos blocos dos testes finais.	60

Figura 5.15 – Teste para normalidade para os valores de resistência à flexão dos blocos dos testes finais.	61
Figura 5.16 – Histograma dos valores de resistência à flexão dos blocos dos testes finais.	62
Figura 5.17 – Micrografia MEV de microestrutura típica dos blocos obtidos com o rejeito depositado na Barragem de Candonga.	63
Figura 5.18 – Espectro de FTIR do material das manchas brancas (MB) da superfície dos blocos obtidos com o rejeito depositado na Barragem de Candonga comparado aos do carbonato de sódio (CS) e do metasilicato de sódio penta-hidratado (MSP) da biblioteca do NIST.	63
Figura 5.19 – Difrátogramas das amostras retiradas dos blocos com pior (bloco de nº04) e melhor (bloco de nº08) resultados nos ensaios de compressão.	65
Figura 5.20 – Difrátogramas das amostras retiradas dos blocos com pior (bloco de nº29) e melhor (bloco de nº17) resultados nos ensaios de flexão.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Fatores estudados para a obtenção de blocos com a amostra do rejeito de Candonga.....	29
Tabela 5.1 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “absorção de água”.....	41
Tabela 5.2 – Resultado do cálculo dos efeitos para a absorção de água a partir da Tabela 5.1, realizado com auxílio do Minitab 17.....	42
Tabela 5.3 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “densidade”.	43
Tabela 5.4 – Resultado do cálculo dos efeitos para a densidade a partir da Tabela 5.3, realizado com auxílio do Minitab 17.....	44
Tabela 5.5 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “resistência à compressão” (RC).....	45
Tabela 5.6 – Resultado do cálculo dos efeitos para a resistência à compressão a partir da Tabela 5.5, realizado com auxílio do Minitab 17.....	46
Tabela 5.7 – Efeitos observados nos testes intermediários.	47
Tabela 5.8 – Resultado da inspeção visual dos blocos obtidos nos testes finais.....	50
Tabela 5.9 – Resultados de absorção de água dos blocos dos testes finais.....	52
Tabela 5.10 – Relação da absorção de água com a inspeção visual dos blocos dos testes finais.	54
Tabela 5.11 – Perda de massa dos blocos dos testes finais, obtida pela secagem dos blocos após o teste de absorção de água.	57
Tabela 5.12 – Densidade dos blocos dos testes finais.....	57
Tabela 5.13 – Resultado para o ensaio de resistência à compressão em 15 blocos dos testes finais.	59
Tabela 5.14 - Resultado para o ensaio de resistência à flexão (RF) em 15 blocos dos testes finais.	61

LISTA DE NOTAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectroscopia por dispersão de raios X
FTIR	Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
m	Massa
NBR	Norma brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
RC	Resistência à compressão
TTAC	Termo de Transação de Ajustamento de Conduta

RESUMO

Após o colapso da Barragem de Fundão, em 5 de novembro de 2015, em Mariana, Minas Gerais, estima-se que 9 milhões de toneladas de rejeitos, oriundos das etapas de deslamagem e flotação do processo de concentração do minério de ferro, foram depositados na Barragem de Candonga. Esses rejeitos estão sendo dragados e armazenados em um local nas proximidades pela Fundação Renova. Devido à alta concentração de quartzo presente em amostras coletadas, seu uso como matéria-prima para fabricação de produtos para construção civil está sendo considerado como forma de promover uma atividade econômica alternativa para as comunidades afetadas pelo acidente. Blocos foram obtidos a partir da mistura de carbonato de sódio (5% em peso) e de água (13% em peso) ao rejeito seco até a formação de uma massa homogênea que foi prensada na forma de bloco e este tratado termicamente a 700°C ao ar. Uma matriz vítrea se formou em torno das partículas de quartzo, o que proporcionou uma resistência mecânica suficiente ao produto para seu emprego na construção civil. A absorção de água nos blocos ficou na faixa de 12-16%, a perda de massa dos blocos na água não foi significativa, a densidade foi de $1,95 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, a resistência à compressão foi de $11,05 \pm 1,29 \text{ MPa}$ e a resistência à flexão foi de $4,42 \pm 0,69 \text{ MPa}$. Durante a inspeção visual dos blocos, foram observadas pequenas trincas e poros, bem como o crescimento de manchas brancas em sua superfície. A melhoria dos processos de moldagem, prensagem e desmoldagem, assim como o ajuste do programa de tratamento térmico podem evitar ou atenuar esses defeitos. Os resultados alcançados pelo produto desenvolvido com o rejeito de Candonga demonstraram ser possível sua utilização na construção civil, como produto similar ao tijolo cerâmico maciço para alvenaria e também ao ladrilho hidráulico.

Palavras-chave: rejeitos; blocos; construção civil; fundente; tratamento térmico.

ABSTRACT

After the collapse of the Fundão dam, on 5th November 2015, in Mariana, it is estimated that 9 million tons of tailings from desliming and flotation of iron ore concentration processing were deposited in the Candonga dam. These tailings are being dredged out and stored in a nearby location by RENOVA Foundation. Due to the high concentration of quartz in the collected samples, its use as raw material for manufacturing of products for civil construction is being considered to promote alternative economic activity for the communities affected by the accident. Blocks were obtained by adding sodium carbonate (5wt%) and water (13wt%) of to the dried tailing, mixing, and heating to 700°C in air. A glass layer forms around the quartz particles that give mechanical strength to the block sufficient to be used in civil construction. The water absorption is in the 12-16% range, the loss of mass in water is not significant, the density is $1.95 \pm 0.03\text{g/cm}^3$, the compression resistance is $11,05 \pm 1.29\text{MPa}$, and the flexural resistance is $4.42 \pm 0.69\text{MPa}$. During the visual inspection of the blocks, small cracks and pores were observed, as well as the growth of white spots (efflorescence) on its surface. The improvement of the moulding, pressing, demoulding, and the adjustment of the heat treatment program can avoid or attenuate these defects. The results obtained by the product developed with the tail showed that it is possible its use in civil construction, as a product similar to solid ceramic masonry brick and also to hydraulic tile.

Keywords: tailings; blocks; civil construction; fluxing; heat treatment.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados divulgados pela Samarco Mineração¹ em 2016, 55 milhões de toneladas de rejeitos, oriundos das etapas de deslamagem e flotação do processo de concentração do minério de ferro, foram liberados pelo rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 05/11/2015. Estima-se que 11 milhões de toneladas ficaram retidos na Barragem de Santarém e 9 milhões de toneladas foram depositados na Barragem de Candonga. Cerca de 35 milhões de toneladas foram depositados no leito do rio Gualaxo do Norte ou foram levados e depositados pelo rio Doce em outros locais ao longo do seu curso, causando uma série de impactos sociais, econômicos e ambientais.

Em dezembro de 2015, amostras do rejeito coletado na Barragem de Candonga foram analisadas por meio de inspeção visual, difração de raios X e granulometria a laser. A inspeção visual mostrou a presença de galhos, raízes e folhas de árvores. A Figura 1.1 mostra o aspecto do rejeito de Candonga após secagem ao sol e catação da matéria orgânica, e a Figura 1.2 apresenta a distribuição granulométrica desse rejeito comparada com as faixas requeridas para a areia utilizada em concretos de cimento Portland. Resultados de difração de raios X (FIG.1.3) mostraram que o rejeito é constituído, percentual em peso, de 77,8% de quartzo, 11,4% de hematita, 10,7% de goethita, 0,1% de argilas (principalmente caulinita) e matéria orgânica, cuja maior parte pode ser removida por catação. Essas amostras têm uma composição parecida com a do rejeito da flotação (rejeito arenoso) gerado pela Samarco, porém a granulometria é mais fina, devido à maior porcentagem de hematita e goethita.



Figura 1.1 – Aspecto do rejeito de Candonga após secagem ao sol e catação de matéria orgânica.

¹Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/barragem-de-rejeitos-se-rompe-em-distrito-de-mariana.html>>. Acesso em: 24 jan. 2016.

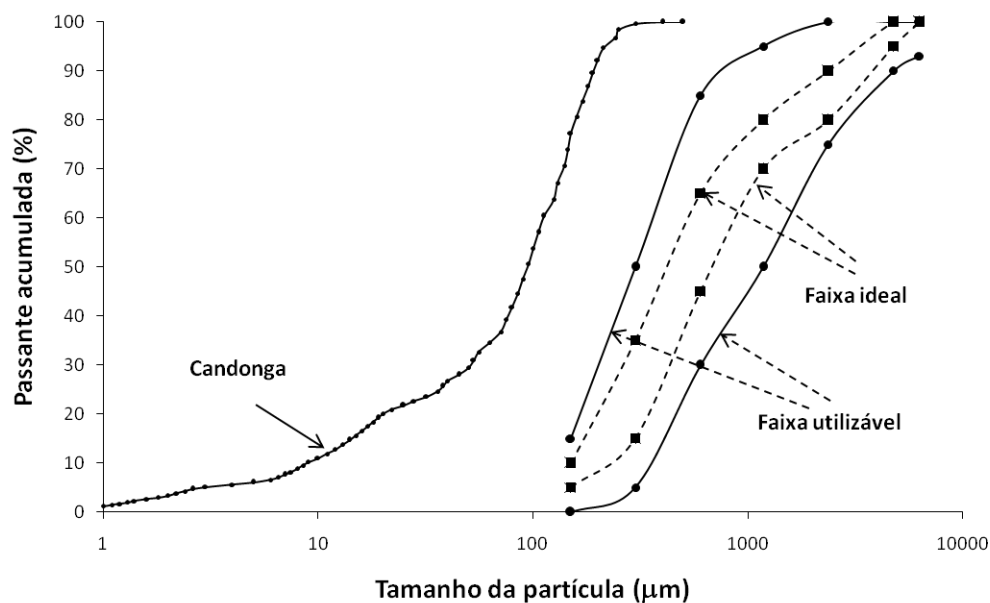


Figura 1.2 – Comparação das distribuições granulométricas da amostra de rejeito de Candonga e da areia natural com as faixas requeridas para utilização em concretos conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

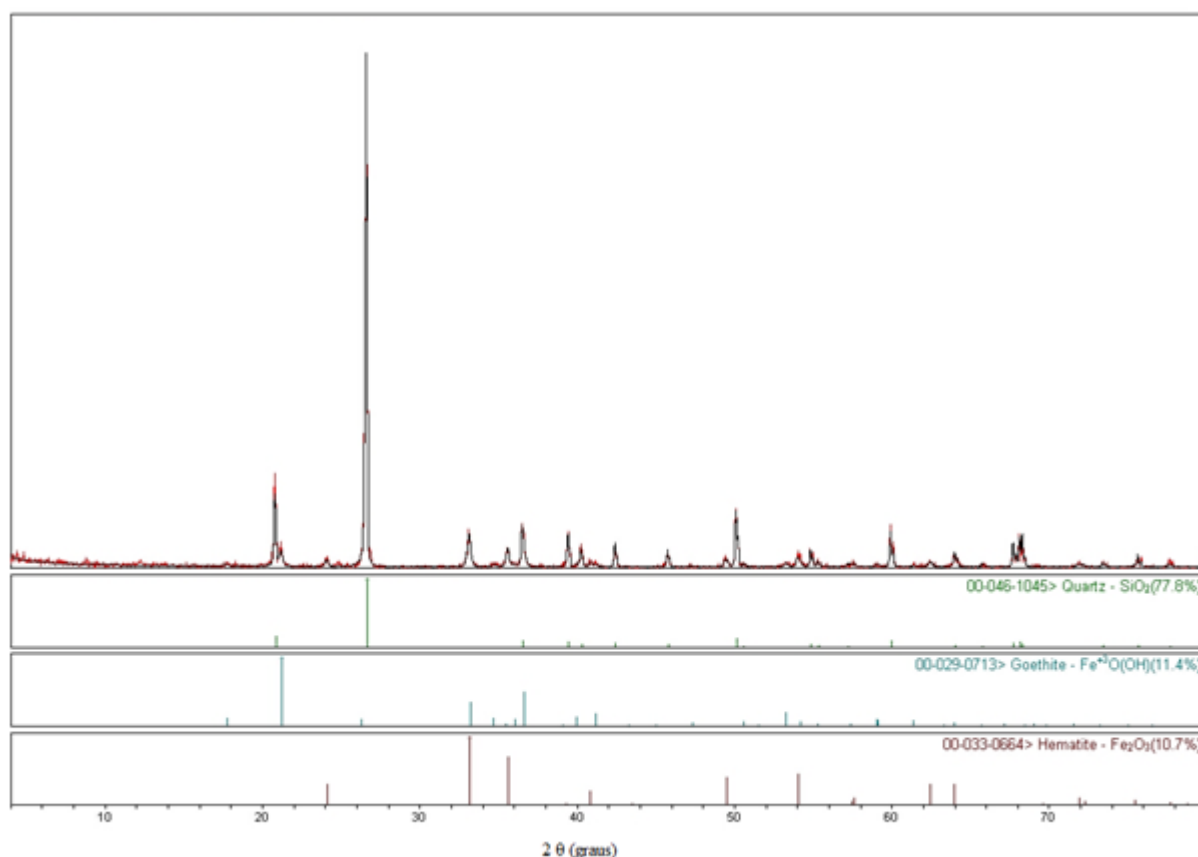


Figura 1.3 – Difratoograma do rejeito de Candonga.

Pesquisas anteriores realizadas no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), citadas adiante, demonstraram a possibilidade de obtenção de produtos cimentícios com o uso do rejeito arenoso proveniente da flotação no processo de concentração de minério

de ferro da Samarco. Porém, a resistência mecânica ficou comprometida quando se utilizaram altas frações de rejeito arenoso em substituição à areia comum, devido à sua fina granulometria.

A Figura 1.4 traz uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma amostra de rejeito coletada na Barragem de Candonga. As partículas maiores são constituídas de quartzo, enquanto as partículas menores são constituídas de óxidos de ferro e argilas.

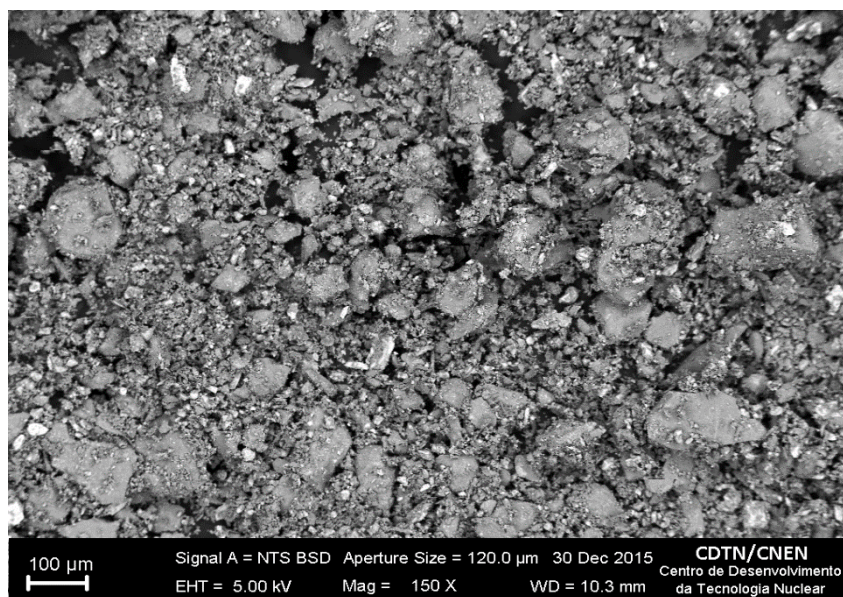


Figura 1.4 – Micrografia do rejeito depositado na Barragem de Candonga: morfologia das partículas.

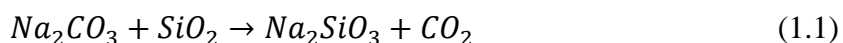
A alta concentração de quartzo observada nas amostras de rejeito coletadas proporciona a possibilidade de sua utilização na fabricação de produtos para a construção civil. Essa pode ser uma alternativa de uso como matéria-prima para o rejeito que precisa ser retirado da Barragem de Candonga e dos leitos dos rios, assim como para reduzir a necessidade da sua estocagem em outros locais. Pode ainda ser uma forma de agregar valor a esse material, diversificando as atividades econômicas das regiões afetadas pelo acidente, gerando novas oportunidades de emprego e renda para a população local.

Entretanto, a matéria orgânica que se encontra associada ao rejeito pode ser problemática para a confecção de produtos feitos com cimento Portland, pois uma etapa de separação será necessária. Essa separação poderia ser feita por catação e peneiramento a úmido ou a seco. No caso do peneiramento a úmido, o consumo e poluição de águas podem se tornar problemáticos. No caso do peneiramento a seco, será necessário secar o rejeito e controlar a emissão de poeira.

Uma possibilidade seria a obtenção de um produto cerâmico com adição de argilas ao rejeito e queima ao ar, o que eliminaria a matéria orgânica. Porém, na região onde o rejeito se encontra não há ocorrência/exploração de argilas.

Diante desses fatos, neste trabalho foi investigada uma rota para obtenção de blocos monolíticos com o rejeito da Barragem de Candonga utilizando-se um fundente para o quartzo, como a barrilha (Na_2CO_3). O uso do fundente promove uma fusão parcial das partículas de quartzo, formando um aglomerado que pode interligar as partículas do rejeito após processo de resfriamento e assim aumentar a resistência mecânica do bloco.

A Figura 1.5 mostra de forma esquemática como esse processo ocorre. O contato da barrilha com as partículas de quartzo em temperaturas superiores a 380°C promove a seguinte reação:



Acima de 575°C , com a transformação de quartzo α para quartzo β , ocorre a seguinte reação:

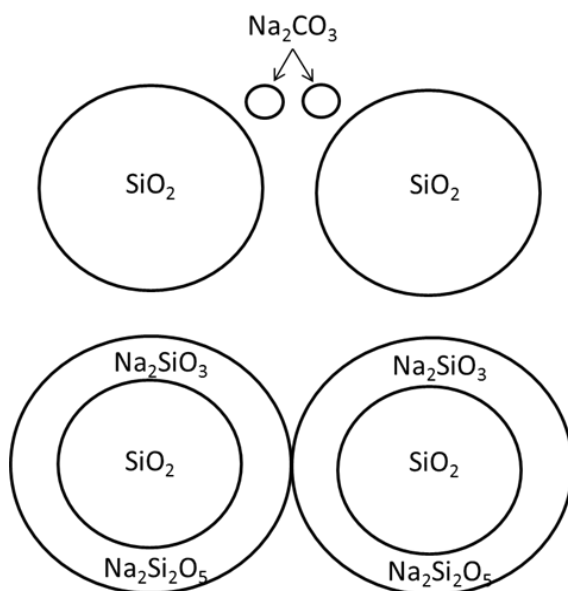
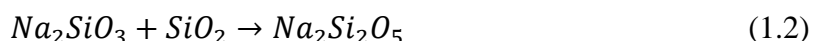


Figura 1.5 – Representação esquemática da reação das partículas de Na_2CO_3 com o quartzo (SiO_2) que forma um filme líquido, constituído de Na_2SiO_3 e $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, em torno das partículas de quartzo que promove a sua adesão com as partículas vizinhas.

Em elevadas temperaturas, tanto o Na_2SiO_3 quanto o $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ são fases líquidas que molham a superfície das partículas de quartzo e promovem a adesão entre elas, formando uma estrutura rígida, fase vítrea, após o resfriamento. As partículas de óxido de ferro e argila também são aderidas a esta fase vítrea. A matéria orgânica é queimada durante o aquecimento. A Figura 1.6 exibe uma imagem de microscopia óptica da microestrutura de uma pastilha feita com o rejeito de Candonga para mostrar esse fato, onde pode ser observado o fenômeno da adesão entre as partículas de quartzo. A Figura 1.7 apresenta a fotografia de uma pastilha obtida por meio de adição de barrilha, prensagem e aquecimento. A pastilha em formato cilíndrico possui diâmetro de aproximadamente 1cm.

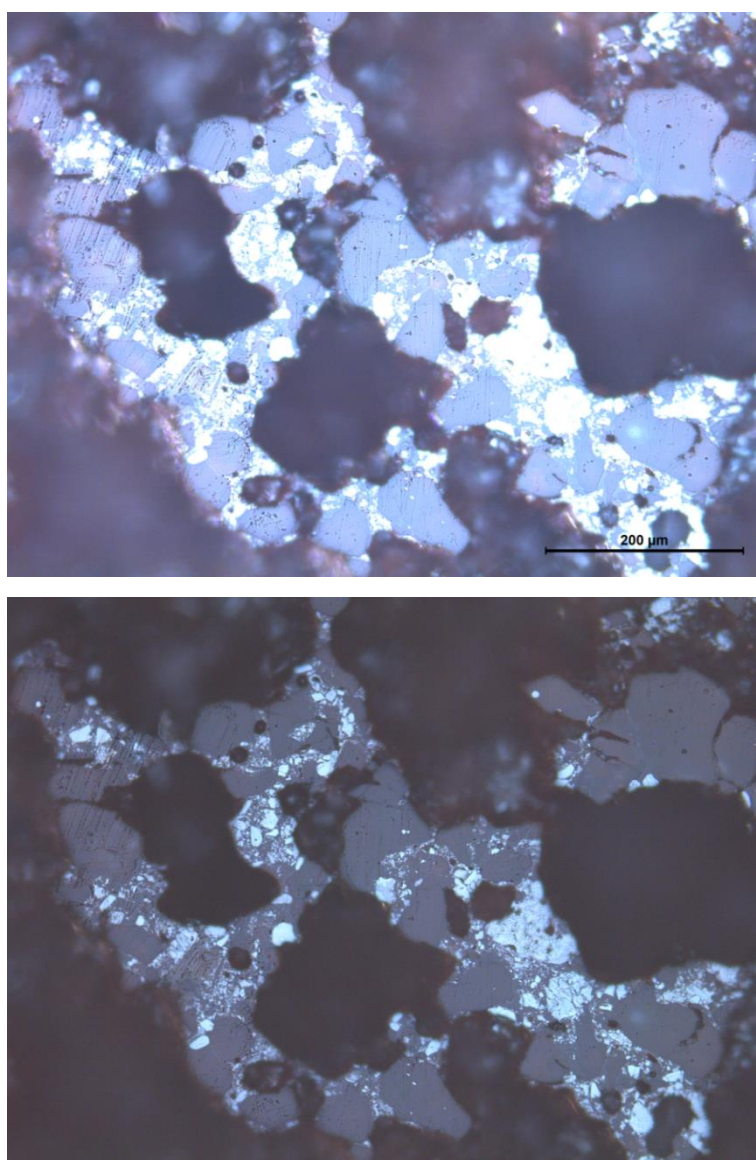


Figura 1.6 – Micrografia óptica de uma seção polida de um monólito obtido com o rejeito de Candonga com adição de barrilha. A imagem inferior foi obtida com luz polarizada. As regiões mais claras são formadas por material vítreo, responsável pela aglomeração e resistência mecânica do material.



Figura 1.7 – Fotografia de uma pastilha obtida com amostra do rejeito de Candonga com adição de barrilha, por meio de prensagem e aquecimento a 950°C.

A importante inovação apresentada por este trabalho está na possibilidade de utilização de uma fração superior a 90% de rejeito na composição dos blocos, ao incorporar a ele um fundente como a barrilha, um produto de baixo custo, utilizado na fabricação de vidros, na correção do pH de piscinas e em outros segmentos industriais. Conforme testes anteriores a este trabalho, realizados em dezembro de 2015, adições de pequenas porcentagens em peso de barrilha seriam suficientes para obter monólitos com boa resistência mecânica.

Destaca-se que os resultados obtidos anteriormente a execução do presente trabalho, apresentados nesta Introdução para sua contextualização, basearam-se nos mesmos processos e técnicas descritos no Capítulo 4.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obter blocos monolíticos a partir do rejeito da Barragem de Fundão que ficou depositado na Barragem de Candonga, para emprego na construção civil, com a utilização de um fundente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o rejeito depositado na Barragem de Candonga, coletado em 2016, em relação à composição, à morfologia e à granulometria;
- Desenvolver processo para obtenção dos blocos com rejeito em escala de bancada;
- Identificar a influência dos seguintes fatores na obtenção dos blocos:
 - Teor de fundente (barrilha);
 - Teor de umidade da mistura;
 - Pressão de compactação;
 - Temperatura do tratamento térmico ao ar;
- Caracterização dos blocos produzidos no que se refere à absorção de água, perda de massa após a imersão em água, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão e microestrutura;
- Identificação de possíveis aplicações para os blocos produzidos com o rejeito considerando suas características técnicas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados os referenciais teóricos relevantes para o entendimento e contextualização do escopo deste estudo. Para isso realizaram-se pesquisas acerca da assinatura do Termo de Transação de Ajustamento de Conduta (TTAC) entre a Samarco, Governo Federal, Estadual (de Minas Gerais e do Espírito Santo) e outros órgãos governamentais; da criação da Fundação Renova; e de estudos diversos que propõem o reaproveitamento de rejeitos da mineração para fabricação de produtos para a construção civil.

3.1 TTAC

O rompimento da Barragem de Fundão causou uma série de impactos sociais, econômicos e ambientais. O volume de rejeitos liberados provocou a morte de 19 pessoas, atingiu Bento Rodrigues, distrito do município de Mariana, em Minas Gerais. Após passar pelo distrito, alcançou os rios Gualaxo do Norte – impactando a cidade de Barra Longa – e do Carmo. Depois, atingiu o rio Doce. Ao chegar à usina hidrelétrica Risoleta Neves, conhecida como usina de Candonga, parte dos rejeitos ficou contida no barramento e na área do reservatório da usina. A pluma formada pela água e pelos rejeitos continuou seu fluxo pelo rio Doce, atingindo sua foz, no distrito de Regência, município de Linhares no Estado do Espírito Santo. Parte dos rejeitos carregados além dos limites do reservatório de Candonga se diluiu ao longo do rio Doce, impactando cerca de 680km de corpos hídricos da bacia hidrográfica: 39 municípios foram atingidos nos estados de Minas Gerais e do Espírito Santo; um número considerável de famílias perdeu suas casas, propriedades rurais (cerca de 2,2 mil hectares) ficaram inundadas e impedidas de produzir; a captação direta de água no rio Doce foi interrompida temporariamente, comprometendo o abastecimento em nove cidades²; o leito dos rios atingidos sofreu assoreamento; habitats aquático e terrestre foram danificados com impactos na vegetação, morte de peixes e espécimes da cadeia trófica.³

²Disponível em: < <http://www.samarco.com/rompimento-de-fundao/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

³Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2016/07/ttac-final-assinado-para-encaminhamento-e-uso-geral.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

Em razão desses acontecimentos foi protocolada uma Ação Civil Pública na justiça em face da Samarco e de seus acionistas. O Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) é um acordo judicial que visa por fim ao litígio por ato voluntário das partes, buscando a resolução da controvérsia de forma mais célere e efetiva. Assinado entre Samarco, Governo Federal, Governos Estaduais de Minas Gerais e Espírito Santo, e outros órgãos governamentais. O termo estabeleceu programas a serem executados para a reparação, restauração e reconstrução do meio ambiente e das comunidades impactadas pela passagem dos rejeitos. Além disso, determinou a criação de uma Fundação autônoma, sem fins lucrativos, como responsável pela elaboração, planejamento e execução das ações necessárias à implementação desses programas.

O TTAC determina que as ações e medidas executadas pela Fundação contemplem 42 programas, classificados em programas socioeconômicos e programas socioambientais. Define ainda que, a elaboração e a execução dos programas devem ocorrer com transparência, engajamento das comunidades impactadas na tomada de decisões e preferência pela contratação de mão de obra local e regional para estimular a economia. Estabelece também os termos de fiscalização e supervisão pelo poder público e população impactada dos programas, com a realização de auditorias externas e criação de uma ouvidoria para atender aos cidadãos.

3.2 FUNDAÇÃO RENOVA

A Fundação Renova⁴ conduz as ações para reparar e compensar os danos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão e nasceu após a assinatura do TTAC entre Samarco, com o apoio de suas acionistas, Vale e BHP Billiton, e o Governo Federal, os Estados de Minas Gerais e do Espírito Santo, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), a Agência Nacional de Águas (ANA), o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a Fundação Nacional do Índio (Funai), o Instituto Estadual de Florestas (IEF), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), o

⁴Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/a-fundacao/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo (IDAF) e a Agência Estadual de Recursos Hídricos (AGERH).

A Fundação Renova desenvolve programas socioeconômicos, que envolvem medidas necessárias à reparação, mitigação, compensação e indenização pelos danos socioeconômicos; e programas socioambientais, necessários à reparação e compensação pelos danos socioambientais. Os programas são baseados nos princípios da remediação e compensação e consistem, respectivamente, em restaurar e restabelecer as comunidades e recursos impactados pelo rompimento da barragem; e em substituir ou compensar o que não é passível de remediação.

Para mitigar os impactos gerados, a atuação da Fundação segue três eixos temáticos. O eixo “Pessoas e Comunidades” se ocupa de programas voltadas a identificação e indenização dos impactados, educação e cultura, saúde e bem-estar, comunidades tradicionais e indígenas, fomento à economia, engajamento e diálogo. O eixo “Terra e Água” desenvolve e implementa planos que envolvem o uso do solo, a gestão hídrica, o manejo do rejeito, a biodiversidade, a assistência aos animais e a inovação. O eixo “Reconstrução e Infraestrutura” engloba as intervenções visando o reassentamento, a contenção do rejeito, o tratamento de água e efluentes, e a recuperação da infraestrutura urbana e acessos. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram, respectivamente, os valores investidos por programa e por eixo temático pela Fundação em 2016.



Figura 3.1 – Custos realizados por programa até dezembro de 2016.
Fonte: Relato de atividades 2016 (Fundação Renova, 2017a).

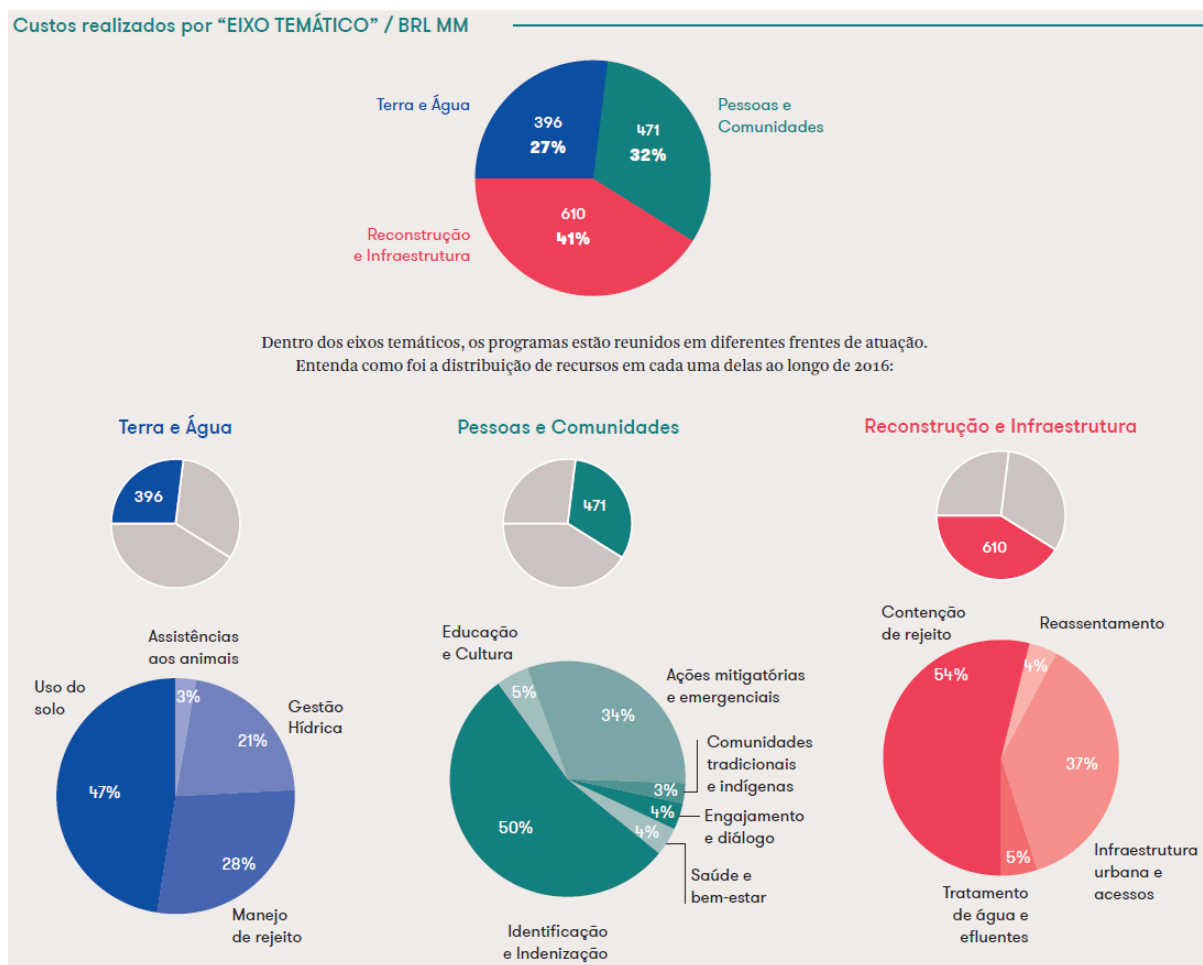


Figura 3.2 – Custos realizados por eixo temático até dezembro de 2016.
Fonte: Relato de atividades 2016 (Fundação Renova, 2017a).

Dentre os programas socioeconômicos previstos pelo TTAC para serem elaborados, desenvolvidos e executados pela Fundação, está o Programa de Apoio à Pesquisa para Desenvolvimento e Utilização de Tecnologias Socioeconômicas Aplicadas à Remediação dos Impactos. Esse programa determina que a Fundação deve fomentar e financiar pesquisas voltadas à utilização econômica e disposição do rejeito, através da criação e fortalecimento de linhas de pesquisa de tecnologias relacionadas à recuperação das áreas impactadas, com internalização das tecnologias geradas para o processo de recuperação.

Visando alcançar esse objetivo, estão sendo assinadas parcerias com a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes). A Fundação Renova pretende apoiar o desenvolvimento de produtos certificados e patenteados, que possam alavancar a economia local. Já existem projetos experimentais para a produção de blocos para pavimentação e plantas-pilotos nas localidades de Santa Cruz do Escalvado e de Ponte Nova para a produção de tijolos para a

construção civil (FIG.3.3). A Praça de Barra Longa, por exemplo, foi reconstruída com blocos feitos de rejeitos (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017a; FUNDAÇÃO RENOVA 2017b).



Figura 3.3 – Tijolos para a construção civil.
Fonte: Arquivo Fundação Renova

3.3 REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com a Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo é o material descartado resultante de atividades humanas cuja destinação ambientalmente adequada pode ser a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético ou a estocagem final. O rejeito é um tipo de resíduo para o qual se julgam esgotadas todas as chances de ser reaproveitado ou reciclado de maneira tecnologicamente disponível e economicamente viável, não apresentando outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

O rejeito da mineração corresponde ao material descartado proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro. Em geral, é composto por minério de ferro, quartzo e água, não sendo substâncias tóxicas de acordo com as normas NBR 10004 (ABNT, 2004a), 10005 (ABNT, 2004b) e 10006 (ABNT, 2004c). Apresenta-se em duas formas: uma na de rejeito de granulometria arenosa que possui mais de 80% em peso de quartzo e o restante de hematita; e outra na de rejeito de granulometria de argila com tamanho fino de grão,

constituído de óxido de ferro hidratado (goethita) e quartzo, e que forma uma lama quando misturado com a água (FREIRE, 2012).

Em relação a sua origem, os rejeitos da mineração classificam-se em sólidos, líquidos e lamas. Os rejeitos líquidos têm origem na água empregada nas diversas etapas de processamento e podem conter óleos e ácidos. As lamas são provenientes dos processos de decantação de efluentes e de separação magnética. Os rejeitos sólidos reúnem minérios pobres, estéreis, rochas, rejeitos finos e ultrafinos (PEREIRA JUNIOR, 2011). Os milhares de toneladas de rejeitos produzidos diariamente pela atividade mineradora são armazenados em barragens ou utilizados no preenchimento de cavas de mineração.

A deposição dos rejeitos pode causar vários impactos ambientais e paisagísticos, além de situações de risco. As barragens apresentam alto custo de manutenção por exigirem monitoramento constante, promovem a poluição atmosférica e visual, a esterilização do solo, além dos riscos à vida e impactos ao meio ambiente em caso de rompimento. Em Minas Gerais, no ano de 2016, existiam 737 barragens de contenção de rejeitos, resíduos e reservatórios de água, sendo que 439 são detidas pelo setor de mineração, representando 59,6% das estruturas no Estado (FEAM, 2017).

Uma maneira de reduzir os problemas provenientes do armazenamento de rejeitos da mineração é a sua utilização como matéria-prima em outro ramo industrial, sobretudo na área da construção civil, uma vez que é o setor que mais consome recursos naturais. Essa alternativa para destinação dos rejeitos também é interessante por evitar a extração de matéria-prima virgem, atividade responsável por grandes danos ao meio ambiente.

De acordo com suas características químicas e físicas, estes rejeitos se tornam insumos para outros setores produtivos como ladrilhos hidráulicos, blocos pré-moldados para pavimentação intertravada ou alvenaria, artefatos cerâmicos como blocos estruturais ou para alvenaria, sais férricos para saneamento básico, pigmentos para tintas e pelotas de alta sílica.

Trabalhos diversos demonstraram ser viável a utilização desses rejeitos para a geração de novos produtos.

A pesquisa sobre a reutilização de rejeitos de atividades industriais, mineradoras e urbanas vem sendo intensificada em todo o mundo, encabeçada por Europa e Ásia. No Brasil, diversos pesquisadores têm-se dedicado ao estudo desse tema, exibindo resultados bastante relevantes (MENEZES, NEVES e FERREIRA, 2002).

O crescente volume de rejeitos gerados, a possibilidade de reduzir os custos com a manutenção de barragens e de agregar valor a esse material são vantagens reconhecidas pelas

mineradoras traduzidas na busca por parcerias com instituições de pesquisa para o reaproveitamento de rejeitos. Já a redução de custos se torna atraente às potenciais indústrias que incorporam rejeitos em seus produtos através da economia na aquisição de matérias-primas, da diversificação da oferta e da redução do consumo de energia no seu processamento.

Um dos grupos de pesquisa do setor de Ciência e Tecnologia de Materiais do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) explora a utilização do rejeito arenoso e argiloso em várias linhas de produtos como a pedra composta, materiais compósitos mesclando o rejeito arenoso e matéria plástica, pigmentos, tintas e produtos cimentícios.

Pereira Júnior (2011) propôs a utilização do rejeito arenoso em argamassas em substituição à areia natural, fazendo uma avaliação por meio de estudo comparativo das propriedades de argamassas contendo rejeito arenoso do itabirito e areia natural. Testes foram realizados com argamassas frescas e endurecidas com o objetivo de avaliar sua viscosidade, tempo de pega, porosidade, densidade e resistência à compressão. Em alguns testes, o produto obtido, utilizando-se o rejeito apresentou resultados que divergiam da tendência prevista na literatura para as argamassas com areia natural. O teste de carbonatação demonstrou a adequação das argamassas com rejeito arenoso para uma utilização preferencial em estruturas não armadas, como calçadas. Comparando-se todas as formulações de argamassa com rejeito em termos de propriedades, a melhor formulação apresentou boa trabalhabilidade e tempo de pega adequado, com densidade de $2,05\text{g/cm}^3$ e resistência à compressão de $19,2\text{MPa}$, o que sugeriu a sua utilização na produção de artefatos para a construção civil.

Outro trabalho (MELO, 2012), explorou a substituição de agregados miúdos naturais na preparação de argamassa com cimento Portland pelo rejeito arenoso gerado na extração do itabirito. Foram preparadas formulações de argamassa variando alguns fatores como o tipo de cimento, o traço (proporção entre cimento e agregado) e a relação água/cimento (a/c). Os produtos obtidos foram caracterizados através de medidas de viscosidade e densidade da pasta, tempo de pega, densidade, resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, massa específica, fases presentes e microestrutura. Foram investigados os efeitos dos fatores sobre as propriedades das argamassas.

Constatou-se que o rejeito arenoso exhibe atributos favoráveis ao seu emprego como agregado miúdo em artefatos de cimento, tais como alta disponibilidade, elevada uniformidade das partículas e ausência de materiais deletérios. Mas, sua baixa granulometria (valor máximo de $420\mu\text{m}$) associada às características de arredondamento (baixa angularidade

do agregado) e textura impõe dificuldades ao preparo de produtos cimentícios. Essas características fazem com que o rejeito requeira maior quantidade de água para o preparo da argamassa do que os agregados tradicionais. Uma maior quantidade de água exige também que se utilize maior quantidade de cimento para obter resistências equivalentes.

Portanto, as características físicas do rejeito arenoso definem o uso de elevadas relações a/c e traço com quantidade limitada de agregado, além do emprego de aditivo redutor de água para que se obtenham argamassas de boa trabalhabilidade e peças de alta resistência à compressão. Constatou-se também que o tipo de cimento tem influência significativa sobre a resistência à compressão e a massa específica aos 28 dias. Resistências de até 19,5MPa aos 28 dias foram alcançadas com a utilização de cimento CPV, a/c 0,80 e traço 1:2. Assim, os resultados alcançados durante o estudo comprovam a possibilidade de utilização desse rejeito como agregado miúdo.

Freire (2012) investigou a utilização do rejeito arenoso como agregado em blocos de pavimentação em substituição a agregados naturais. A técnica de cimentação foi utilizada para auxiliar na confecção de diferentes formulações de argamassas, por meio do planejamento fatorial, variando-se o traço (proporção cimento: rejeito, em volume), a relação água/cimento (em massa) e o tipo de cimento utilizado. As argamassas frescas foram ensaiadas para verificação de sua viscosidade, densidade e tempo de pega, já os produtos solidificados, foram submetidos à avaliação de densidade, índice de vazios e a resistência à compressão em diferentes idades (7, 28, 90, 150 e 300 dias). Os resultados indicaram que dos 90 aos 300 dias apenas o traço é significativo para a resistência à compressão, sendo maiores para as argamassas com o traço 1:2 e que, após esse tempo, todos os resultados não são mais diferentes entre si, com 10% de significância.

Testaram-se também dois superplastificantes e dois pigmentos, na formulação escolhida por apresentar melhor custo benefício (cimento CPV, traço 1:2,5 e relação água/cimento igual a 0,80). O superplastificante Viscocrete 20HE apresentou maior valor a 0,9% em massa de cimento e o Viscocrete 5700, a 0,3%. O uso de pigmentos aumentou a resistência dos corpos de prova e foi mais efetivo para o pigmento vermelho aos 16% (de 13,13 para 18,09MPa) e aos 8% de pigmento natural (de 13,13 para 16,16MPa).

Foram realizados, ainda, experimentos, com a produção de blocos intertravados, para verificar a possibilidade de reprodução em escala piloto dos resultados obtidos em laboratório. Registrou-se a repetitividade, mas não a reprodutibilidade, possivelmente associada aos diferentes teores de umidade apresentados pelo rejeito em cada uma das

situações analisadas. Assim, concluiu-se que foi possível produzir blocos de pavimentação utilizando o rejeito como agregado em escala piloto e eles podem ser utilizados em calçadas e estacionamentos.

Tavares (2012) analisou a viabilidade técnica de produção de pigmentos inorgânicos de óxido de ferro através do tratamento físico-químico da lama proveniente do beneficiamento de itabirito. Foram obtidos três pigmentos de diferentes tonalidades e proposta sua incorporação a tintas e blocos intertravados de concreto.

As tintas produzidas com estes pigmentos apresentaram características de cobertura, tingimento, viscosidade, aderência, secagem e acabamento equivalentes às disponíveis no mercado. Identificou-se que o aumento da quantidade de pigmento na formulação ou sua mistura com pequenas quantidades (20% m/m) do pigmento comercial melhoraram o poder de cobertura das tintas.

Aos blocos intertravados de concreto foram incorporados dois tipos de pigmentos em quatro níveis de concentração. A viscosidade, densidade e a resistência à compressão (28 dias) aumentaram com a elevação no teor de pigmento. O tempo de pega foi influenciado pelo tipo de pigmento empregado. A resistência mecânica dos blocos pigmentados foi superior à observada para aqueles sem pigmentação de formulação equivalente.

Assim, a incorporação da lama como pigmento em tintas e blocos de concreto se mostrou viável e capaz de consumir esse rejeito da mineração.

Silva (2013) demonstrou ser possível o aproveitamento do rejeito arenoso para obtenção de pedra composta. A pedra composta é um produto industrial similar ao granito ou ao mármore natural, produzida a partir de agregados naturais que podem representar de 91 a 96% da massa total. Os agregados naturais são misturados com resina insaturada de poliéster e colocados em um molde, em seguida passam pelo processo de vibrocompactação à vácuo e, posteriormente, pela cura. Seu uso na construção civil está associado ao revestimento de paredes, bancadas e pavimentos.

A produção de pedra composta a partir do rejeito proveniente da exploração do itabirito como minério de ferro, tendo em vista que esse rejeito é rico em quartzo, é uma promissora alternativa para a sua destinação e agregação de valor ao gerar um novo produto. Durante o estudo, foram analisados simultaneamente por meio do planejamento de experimentos os efeitos de seis parâmetros no processo de obtenção da pedra composta. Adotando-se a tensão de flexão como resposta ao planejamento de experimentos, conclui-se que o tipo de resina e o uso de promotor de adesão são os fatores mais influentes. A tensão

média de ruptura foi determinada utilizando-se estatística de Weibull e os valores registrados se aproximaram mais àqueles encontrados em pedras naturais. A caracterização do produto desenvolvido demonstrou a homogeneidade deste material e a reprodutibilidade do método, de tal forma que o processamento estudado é adequado para a substituição da matéria-prima natural por rejeito de mineração.

Versieux (2015) avaliou o emprego do rejeito arenoso em substituição à areia natural para fabricação de blocos de concreto para pavimentação, no intuito de contribuir para minimização dos impactos causados pela extração da areia natural e dos rejeitos de mineração, além de agregar valor econômico ao rejeito. Foram propostas alterações de traços de argamassa já estudados em pesquisas anteriores, incluindo o uso de brita para fabricação dos blocos de concreto com o objetivo de melhorar as propriedades do produto final. Foram testados oito traços diferentes, nos quais se variou a proporção de brita, fluidificante e a relação água/cimento. As respostas investigadas nos produtos endurecidos foram resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios. Aferiu-se que, com o acréscimo de brita, os blocos apresentaram menor índice de vazios do que os feitos com argamassa, além de aumento de resistência à compressão final (18MPa feitos com argamassa para 24MPa feitos com concreto) aos 28 dias de idade, o que permitiu comprovar a viabilidade técnica do projeto. Os resultados apresentados pela melhor formulação (traço cimento: rejeito: brita de 1:2,5:2,0 em volume, 0,7% de fluidificante e a/c 0,85) sugerem também o uso dos blocos obtidos em calçadas e estacionamentos.

Zuccheratte, Freire e Lameiras (2017) utilizaram o rejeito arenoso e o politereftalato de etileno (PET) reciclado na fabricação de cascalho sintético para concreto, visando à substituição do uso de agregados naturais. A massa unitária deste cascalho é de $0,89\text{kg/dm}^3$, o que o caracteriza como agregado leve.

Através de um planejamento fatorial foi avaliada a influência dos fatores relação cascalho sintético/rejeito (em massa); a relação água/cimento (em massa) e relação fluidificante/cimento (em massa) nas respostas resistência à compressão, índice de vazios, absorção de água e densidade real do concreto obtido com o cascalho sintético. No concreto produzido, o cascalho sintético foi utilizado em substituição ao cascalho natural e o rejeito arenoso foi usado em substituição à areia natural. A resistência à compressão do concreto após 7 dias foi de cerca de 9MPa, a absorção de água variou entre 13,6 e 14,9%, índice de vazios de 27%, já a densidade apresentada foi de cerca de $1,9\text{g/cm}^3$. Tais propriedades demonstraram que o concreto obtido é adequado para fazer blocos leves para alvenaria, sendo

uma atividade de interesse a ser implantada na região das minas. Com aproximadamente 65% em peso de rejeito arenoso e 5% em peso de PET, este é um produto com alto nível de utilização de rejeitos arenosos.

Fatores positivos a se destacar em todas essas iniciativas são o incentivo ao uso racional de recursos naturais, substituindo novas extrações pela reutilização de materiais e também a redução do acúmulo de rejeitos no meio ambiente que geram grande impacto ambiental. Porém, um fator negativo que esses estudos demonstraram, é que a quantidade de rejeito que pode ser utilizada em substituição à matéria-prima natural em produtos cimentícios é limitada, pois se verificou que a resistência mecânica fica comprometida quando se utilizam altas frações de rejeito arenoso em substituição à areia comum devido à sua granulometria fina.

Neste cenário, a indústria cerâmica também se destaca pela elevada capacidade de absorção de rejeitos em virtude do seu volume de produção, grande consumo de materiais e capacidade de neutralizar e estabilizar diversos rejeitos tóxicos. Menezes, Neves e Ferreira (2002) enfatizam o grande potencial de emprego dos rejeitos da mineração como matérias-primas alternativas para a indústria cerâmica. Sua aplicabilidade foi verificada na obtenção de tijolos, blocos e revestimentos (FREIRE e MOTTA, 1995; RAIGÓN e GARCIA e SÁNCHEZ, 1996; VIEIRA *et. al.*, 1999; NEVES e PATRÍCO e FERREIRA, 2000; TAM e TAM, 2006).

Devido às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e as particularidades do seu processo produtivo, alguns estudos registram a possibilidade do uso de formulações compostas com elevado teor de rejeitos (> 50%), principalmente quando os rejeitos agem como formadores de fase vítrea que pode atuar preenchendo os poros do material ou como matriz vítrea ligante de grãos cristalinos (RAIGÓN e GARCIA e SÁNCHEZ, 1996).

O Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande vem aproveitando rejeitos minerais da região Nordeste como insumo para tijolos e blocos não queimados (com e sem função estrutural), na produção de argamassas de assentamento com bons resultados (NEVES e PATRÍCO e FERREIRA, 2000).

O grupo de Geotécnica Experimental Aplicada da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) estuda a preparação de tijolos solo-cimento e outros produtos para construção civil com a incorporação de rejeito arenoso (MELO, 2012).

O grupo de pesquisa RECICLOS⁵, Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos coordenado pelo professor Ricardo André Fiorotti Peixoto, do departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) construiu em 2016 casas sustentáveis a partir de rejeitos retirados de barragens de mineradoras. Situada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC²), a equipe desenvolveu um processo de separação dos rejeitos armazenados nas barragens para a produção de elementos destinados à construção civil. A partir dos rejeitos, foram produzidos o concreto, a argamassa e os blocos para alvenaria e pavimentação utilizados na iniciativa.

Focados na promoção do consumo consciente e reutilização de recursos, o grupo RECICLOS promove estudos que visam encontrar soluções técnica, econômica e ambiental para resíduos sólidos, principalmente àquelas com potencial de se tornarem tecnologias úteis na produção de elementos para a construção civil. Desses estudos derivam pesquisas de alunos de graduação e pós-graduação, além de publicações nacionais e internacionais (FONTES, 2013; SANT'ANA FILHO, 2013; BASTOS, 2013; TOFFOLO *et. al*, 2014; FRANCO *et. al*, 2014; GALVÃO *et. al*, 2017; FONTES *et. al*, 2017). Os resultados alcançados permitiram avaliar que é possível utilizar o rejeito de barragens de minério de ferro como matéria-prima de forma técnica e ambientalmente adequada para a redução dos impactos ambientais da atividade mineradora. Foram desenvolvidas técnicas para sua utilização: como agregado reciclado na produção de argamassas e concretos; na construção de infraestrutura para pavimentação urbana e rodoviária; como também na fabricação de elementos pré-moldados de concreto (blocos de alvenaria e pavimentação); além de tintas e revestimentos hidráulicos. Assim, demonstrou-se que o rejeito é adequado aos propósitos estudados.

Uma maior incorporação de rejeitos como alternativa às matérias-primas convencionais pelas indústrias nacionais em seus produtos depende de estudos prévios para otimização da composição, a fim de se manter as características dos produtos e um ciclo de produção semelhante ao das formulações convencionais (MENEZES, NEVES e FERREIRA, 2002). Para que esses objetivos sejam alcançados, uma intensa cooperação se faz necessária entre as mineradoras, centros de pesquisa e indústrias.

Nesse sentido, a criação da Plataforma R3 Mineral instituiu um espaço de articulação entre organizações científicas, tecnológicas e industriais. O propósito dessa iniciativa é repensar a gestão de rejeitos da mineração em Minas Gerais e ainda possibilitar aplicações em

⁵Disponível em: <<http://www.em2.ufop.br/index.php/ultimas-noticias/178-grupo-de-pesquisa-da-escola-de-minas-constroi-casas-sustentaveis-a-partir-de-rejeitos-de-barragens>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

larga escala. Fazem parte dessa plataforma empresas mineradoras; instituições de ciência, tecnologia e inovação; órgãos públicos; entidades de classe e outras organizações que possam utilizar os rejeitos como matéria-prima em seus processos produtivos⁶. A Plataforma R3 Mineral integra a Plataforma Mineração 4.0⁷, uma das ações do Projeto Nova Mineração coordenado pela Fapemig.

A Samarco em 2017⁸, como parte das ações desenvolvidas há mais de 10 anos em parceria com empresas e universidades para o estudo de alternativas para aproveitar os rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro, firmou parceria com a BeGreen, a primeira fazenda urbana da América Latina localizada no Boulevard Shopping, em Belo Horizonte. É um espaço para a produção de hortaliças sem agrotóxicos com um sistema inovador de cultivo em consórcio com a criação de peixes. Foi utilizado rejeito arenoso da Samarco na produção dos blocos intertravados, usados no piso da fazenda. Com a mesma segurança e durabilidade de um bloco convencional, a fabricação foi executada pela empresa Uni-Stein utilizando-se 30% de rejeito na composição. A Samarco também forneceu lama para a produção de madeiras plásticas, usadas na fabricação de decks, mesas e cadeiras para o espaço. As peças foram fabricadas pela empresa Ecoblock utilizando-se 10% de rejeito na composição, responsável pela sua coloração.

3.4 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são inorgânicos e não-metálicos, constituídos por compostos formados entre elementos metálicos e não-metálicos com ligações interatômicas totalmente iônicas ou predominantemente iônicas. A palavra cerâmica deriva do grego *keramikos* que significa matéria-prima queimada, uma alusão ao fato de que as propriedades desejáveis desses materiais são normalmente alcançadas após processo de tratamento térmico a alta temperatura. São tipicamente isolantes elétricos e térmicos, são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes abrasivos do que os metais e polímeros. Em relação ao seu comportamento mecânico são duros e quebradiços. Nessa classificação se enquadram os

⁶Disponível em: <<https://r3mineral.net/sobre-a-plataforma-2c913970c9ca>>. Acesso em: 01 jan. 2017.

⁷Disponível em: <http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=266634>. Acesso em: 01 abr. 2017.

⁸Disponível em: <<http://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

seguintes grupos de materiais: vidros, produtos argilosos, refratários, abrasivos, cimentos e as cerâmicas avançadas (CALLISTER, 2002).

Inicialmente, os materiais cerâmicos mais conhecidos eram as cerâmicas tradicionais, os vidros e as cerâmicas de alta temperatura. Na categoria de cerâmicas tradicionais encontram-se importantes segmentos industriais, são eles: cerâmica vermelha ou estrutural; materiais de revestimento e cerâmica branca. Compreendem produtos como tijolos, telhas, blocos, tubos cerâmicos, porcelanatos e azulejos, louça sanitária, utensílios decorativos e de mesa. Além da argila como matéria primária, muitos desses produtos contêm minerais não-argilosos como o quartzo finamente moído, que funciona como material de enchimento, e um fundente, como o feldspato que age formando um vidro com ponto de fusão relativamente baixo.

Posteriormente, as cerâmicas avançadas passaram a desempenhar um papel muito relevante por seu emprego nas indústrias de componentes eletrônicos, computadores, comunicação, aeroespacial, nuclear, materiais ópticos, dentre outras.

3.5 TIJOLO MACIÇO CERÂMICO

As normas NBR 7170 (ABNT, 1983a), NBR 6460 (ABNT, 1983b) e NBR 8041 (ABNT, 1983c) caracterizam o tijolo maciço cerâmico como o tijolo que possui todas as faces plenas de material, podendo apresentar rebaixos de fabricação em uma das faces de maior área. O tijolo maciço pode ser classificado como comum ou especial de acordo com sua forma e dimensão. As normas, também, definem as inspeções para o controle de qualidade do tijolo maciço e o método de ensaio para verificação da resistência à compressão.

O tijolo maciço cerâmico é composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas que são adicionadas para darem ao produto final as características desejadas, sendo um dos principais produtos utilizados em alvenaria de vedação na construção civil. Sua produção segue as etapas de conformação hidroplástica por extrusão, secagem artificial e natural, e queima.

Em 2008, o número de cerâmicas e olarias no Brasil era de aproximadamente 6.903 empresas, representando 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil com um faturamento anual de R\$ 18 bilhões de reais. No segmento de blocos e tijolos cerâmicos o

número de empresas era de 4.346 estabelecimentos, o que representava 63% do setor.⁹ Não estão disponibilizados dados mais recentes sobre esse segmento do mercado.

3.6 LADRILHO HIDRÁULICO

O ladrilho hidráulico (FIG.3.4), material de revestimento amplamente utilizado na construção civil, é uma placa cimentícia de alta resistência ao desgaste para acabamentos de paredes, pisos internos e externos, contendo uma superfície com textura lisa ou em relevo, colorida ou não, de formato quadrado, retangular ou outra forma geométrica definida (ABNT, 1986). Segundo a NBR 9457 (ABNT, 2013), esse produto deve apresentar resistência à flexão maior ou igual a 3,5MPa em ensaio realizado de acordo com os procedimentos de ensaio de flexão propostos pela NBR 13818 (ABNT, 1997).



Figura 3.4 – Exemplos de diferentes padrões de ladrilho hidráulico.
Fonte: Adaptado do Manual de Ladrilho Hidráulico: Passeio Público (ABCP, 2010).

⁹Disponível em: < <http://anicer.com.br/setor/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.

O ladrilho hidráulico é constituído de cimento Portland, agregados, pigmentos e água, e possui três camadas distintas: tardez, intermediária e pigmentada. O tardez ou “mescla”, como é nomeada pelos operários do setor, constitui-se em um corpo em argamassa de cimento Portland e pó de pedra; a camada intermediária ou “secante” é constituída por cimento Portland, pó de pedra e areia lavada de rio; e a camada pigmentada é formada pela mistura de cimento Portland branco estrutural, pó de mármore e pigmentos (MARQUES, 2012).

A principal característica do ladrilho hidráulico é a sua capacidade de resistir ao tráfego intenso devido às suas propriedades de ser antiderrapante e possuir alta resistência à abrasão. Por isso, ele é indicado para calçadas, passeios públicos, praças, garagens, estacionamentos, rampas para automóveis, ambientes internos, bordas de piscinas etc., oferecendo segurança para as pessoas mesmo quando molhados (ABCP, 2010). O ladrilho também é vastamente utilizado como piso de sinalização tátil. Os pisos táteis são faixas em alto-relevo fixadas no chão para fornecer auxílio na mobilidade de deficientes visuais, guiando seu trajeto e indicando obstáculos no caminho a ser percorrido.

De maneira a garantir a livre circulação de todos os cidadãos, inclusive das pessoas com mobilidade reduzida ou portadoras de algum tipo de deficiência, diversos municípios brasileiros, como Belo Horizonte, Blumenau, Curitiba e São Paulo, instituíram decretos que preveem a construção de calçadas acessíveis em espaços públicos de grande circulação. Isso significa a presença obrigatória de pisos de sinalização tátil em ambientes como estações de trem, metrô, ônibus e calçadas urbanas, prevendo multas para quem desrespeitar o decreto. O ladrilho hidráulico, sendo um produto que atende às exigências de construção de calçadas acessíveis, terá seu consumo aumentado à medida que novos municípios aderirem a esse movimento.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento de blocos com utilização de rejeitos da Barragem de Candonga, inicialmente foram realizados experimentos exploratórios (testes preliminares). Em seguida realizou-se um planejamento fatorial considerando os fatores e os níveis estabelecidos a partir dos resultados obtidos com os testes preliminares, com a produção de dezesseis blocos (testes intermediários). Após avaliação dos resultados do planejamento fatorial, foram determinadas as condições otimizadas para obtenção de mais trinta blocos, que foram caracterizados (testes finais).

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram: uma amostra de 500kg de rejeito da Barragem de Candonga, cedida pela Samarco no início de 2016; barrilha leve comercial (carbonato de sódio), geralmente utilizada nas indústrias de vidro e detergente, fabricação de outros produtos químicos e controle de pH de piscinas (ABIQUIM, 2000), empregada como fundente; e água de torneira fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

A amostra de rejeito foi espalhada numa área coberta, mas com exposição ao sol no período da tarde do dia, onde permaneceu por cinco dias para secagem. Para a homogeneização, a amostra foi colocada na forma de pilha alongada com auxílio de uma pá (técnica de pilhas). Em seguida, esta pilha foi fracionada nas extremidades e estas frações deram início à formação de uma segunda pilha. Após o início da segunda pilha, fracionaram-se novamente as extremidades da pilha original redistribuindo o material ao longo da segunda pilha. Este procedimento foi realizado até que todo o material da primeira pilha fosse redistribuído na segunda pilha. Assim, a partir da primeira pilha alongada, formou-se uma segunda pilha alongada. Finalmente, o rejeito seco e homogeneizado foi acondicionado em sacos plásticos de 7kg. A Figura 4.1 mostra como se deu essa etapa.



Figura 4.1 – Preparação da amostra do rejeito da Barragem de Candonga.

4.2 OBTENÇÃO DOS BLOCOS

A obtenção dos blocos foi realizada de acordo com as seguintes etapas (FIG.4.2): mistura do rejeito com barrilha e água; conformação por prensagem e aquecimento ao ar. A mistura foi feita com auxílio de uma espátula para homogeneizar o rejeito com a barrilha e água. A barrilha foi dissolvida na água antes da mistura com o rejeito. Em seguida, essa mistura foi assentada num molde retangular e prensada com auxílio de uma prensa hidráulica de bancada (marca Skay, 98kN). Após a conformação do bloco, este foi retirado do molde e colocado em um forno tipo Mufla com controlador de temperatura (marca Eurotherm, modelo 2416) para aquecimento ao ar. Antes da mistura, foi feita uma inspeção visual para retirada da matéria orgânica e outros corpos estranhos de tamanho exagerado.



Rejeito antes e após a desaglomeração



Corpos estranhos retirados por inspeção visual



Pesagem da barrilha e da água



Dissolução da barrilha na água



Solução de barrilha vertida sobre o rejeito



Mistura



Mistura colocada no molde

Figura 4.2 – Sequência de etapas para a obtenção dos blocos.



Molde com a mistura e a tampa para prensagem



Molde colocado na prensa



Peça retirada do molde após prensagem



Peça prensada inserida no forno tipo mufla



Bloco após tratamento térmico ao ar

Figura 4.2 (continuação) – Sequência de etapas para a obtenção dos blocos.

4.3 TESTES PRELIMINARES

Experimentos preliminares foram realizados com pressões de compactação de 1,2 e 2,4MPa, os teores de barrilha na faixa de 1 a 5% em peso, os de água entre 10 e 15% e temperaturas de aquecimento em 600, 650 e 950°C durante 2h, com taxa de aquecimento de 10°C/min e resfriamento natural do forno. Os blocos foram removidos do forno à temperatura ambiente. A análise dos resultados se baseou em aspectos de inspeção visual tais como integridade, presença de trincas e fissuras, ocorrência de esfarelamento e de manchas brancas nas superfícies dos blocos (eflorescência). Também, resultados de ensaios de absorção de água e de compressão foram considerados. Os métodos de caracterização estão descritos na seção 4.6.

Os primeiros tratamentos térmicos foram realizados na temperatura de 950°C. Depois foram realizados tratamentos térmicos nas temperaturas de 600° e 650°C. Blocos obtidos nessas temperaturas mais baixas apresentaram manchas brancas após algum tempo expostos ao ambiente (eflorescência), como mostrado na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Fenômeno da eflorescência (manchas brancas) observado nos blocos aquecidos nas temperaturas de 600 e 650°C. Bloco prensado a 1,2MPa.

Os blocos obtidos com a pressão de compactação de 1,2MPa não apresentaram uma superfície bem consolidada (FIG.4.3) em comparação com aqueles obtidos com pressão de compactação de 2,4MPa. A Figura 4.4 mostra um tijolo típico prensado com maior pressão de compactação.



Figura 4.4 – Bloco prensado a 2,4MPa após o aquecimento.

4.4 TESTES INTERMEDIÁRIOS

Após a realização dos testes preliminares, foi realizada uma série de 16 experimentos elaborados com base em um planejamento fatorial 2^3 considerando como fatores o teor de barrilha, a umidade (teor de água) e a temperatura de aquecimento, com duas réplicas. As respostas avaliadas foram: inspeção visual, absorção de água, densidade e resistência à compressão. Em todos os 16 experimentos, o tempo de tratamento térmico, a taxa de aquecimento e a pressão de compactação foram mantidos, respectivamente, em 2h, $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e 2,4MPa. A Tabela 4.1 mostra fatores e os respectivos níveis considerados no planejamento fatorial.

Tabela 4.1 – Fatores estudados para a obtenção de blocos com a amostra do rejeito de Candonga.

Fatores	Nível	Valores
Teor de barrilha (percentual em peso)	-1	2%
	+1	5%
Umidade (percentual em peso)	-1	13%
	+1	15%
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	-1	800°C
	+1	900°C

Observou-se que os blocos tratados a 900°C apresentaram uma camada mais escura em seu exterior e ficaram mais fragilizados na região central (FIG.4.5). Esta camada foi

formada devido ao deslocamento da fase vítrea, formada pela reação do quartzo com a barrilha, para a superfície do bloco. Esse fato motivou a realização dos testes finais a 700°C, de tal forma a evitar a eflorescência e a migração da camada vítrea para a superfície dos blocos. As demais condições foram estabelecidas a partir dos resultados das respostas do planejamento fatorial.



Figura 4.5 – Bloco após tratamento térmico a 900°C e ensaio de compressão: exterior mais escuro (camada vítrea) e interior fragilizado.

4.5 TESTES FINAIS

Foram obtidos trinta blocos nas seguintes condições:

- Teor de barrilha: 5% em peso;
- Umidade: 13% em peso;
- Tratamento térmico: taxa de aquecimento de 10°C/min, patamar de 2h a 700°C, resfriamento natural com desligamento do forno após o tempo de patamar.

Os blocos foram caracterizados quanto à inspeção visual, dimensões geométricas, absorção de água, perda de massa após a imersão em água, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, avaliação microestrutural através de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada com espectroscopia por dispersão de raios X (EDS). Foi realizada ainda espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) no material coletado das manchas brancas presentes nos blocos.

4.6 CARACTERIZAÇÕES

Nesta seção estão descritas as caracterizações realizadas no rejeito coletado em 2016 e em blocos obtidos durante as etapas de testes preliminares, testes intermediários e testes finais.

4.6.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difratometria de raios X (DRX) foi realizada pelo método do pó em um difratômetro (marca Rigaku, modelo D/Max – Ultima Plus) com as seguintes características: tensão de 40kV, intensidade de corrente de 30mA, anodo de cobre (radiação primária Cu K α 1 = 1.5405 Å e Cu K α 2 = 1.5443 Å), goniômetro em configuração θ - θ e monocromador de grafite. Os

difratogramas foram obtidos com 2θ variando entre 4 e 80° com velocidade de varredura de 4°/min e passo de 0,02°.

A identificação de fases minerais foi realizada no rejeito e nas amostras de blocos obtidos em diferentes condições por meio da comparação dos difratogramas com o banco de dados (Sets 01 – 58; 2008) do *International Center for Diffraction Data* (ICDD) / *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS).

4.6.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para observar a formação de material vítreo, responsável pela aglomeração e resistência mecânica dos blocos, imagens ao microscópio óptico (marca LEICA, modelo DM6 M), com diferentes aumentos, foram obtidas de uma seção de amostra polida. O microscópio possui câmera digital com *software* LEICA Las Phase de captura de imagens

As seções das amostras foram retiradas com uso de serra circular (marca Makita) e preparadas por meio de técnicas de metalografia como embutimento com resina cristal, lixamento com lixas de carbetto de silício e polimento com pasta de diamante.

4.6.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE RAIOS X

A microscopia eletrônica de varredura (marca Carl Zeiss, modelo Sigma VP) teve como objetivo a aquisição de imagens da morfologia das partículas do rejeito e da microestrutura dos blocos. O microscópio possui detectores de elétrons secundários e retroespalhados e tem acoplado o sistema de análise de espectroscopia de energia dispersiva de raios X-EDS (marca Bruker Nano Analytics, modelo XFlash 410-M) com *software* de aquisição e processamento ESPRIT. O EDS foi utilizado para obter uma microanálise química dos blocos. As amostras foram preparadas por meio de técnicas de metalografia e metalizadas com ouro devido ao seu caráter isolante.

4.6.4 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

O rejeito foi caracterizado quanto à distribuição granulométrica em um granulômetro a laser (marca Cilas, modelo 1190) instalado no Laboratório de Combustível Nuclear (LABCON) do CDTN, com faixa analítica de 0,04 a 2500µm e processo de medição e apresentação dos resultados controlados por um sistema aplicativo de computador denominado Size Expert. É um equipamento de caracterização física que determina a medida óptica de uma partícula através de difração a laser para uma determinada faixa de tamanho no material analisado.

O pó, após peneiramento para retirada de galhos e folhas, foi inserido, sem adição de agentes dispersantes, em uma cuba com água que se localiza na parte superior do módulo e, sob agitação, essa solução foi bombeada para o interior do módulo, passando por uma câmara onde o laser incide sobre as partículas através de uma célula de quartzo. Os resultados registrados foram apresentados de forma numérica e gráfica.

Foram ensaiadas três alíquotas retiradas de diferentes pontos de três embalagens de armazenagem do rejeito homogeneizado, cada embalagem continha 7kg de material.

4.6.5 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL E INSPEÇÃO VISUAL

Para a medida das dimensões dos blocos após o tratamento térmico utilizou-se uma régua (para testes preliminares) e um paquímetro, tendo sido registradas em planilha as medidas aferidas. As características observadas na inspeção visual foram registradas em planilha e fotos.

4.6.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com o seguinte procedimento: os blocos foram secos ao ar em estufa a 120°C por 24 horas. Após o fim do programa de

secagem aguardou-se até que os corpos atingissem a temperatura ambiente para que fossem pesados, obtendo-se a massa seca. Em seguida, foram imersos por 24 horas em água à temperatura ambiente, ao serem retirados, o excesso de água superficial foi removido com flanela úmida e foram novamente pesados, obtendo-se a massa saturada.

Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela Equação 4.1:

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

M_1 é a massa bloco seco (g);

M_2 é a massa saturada do bloco (g);

A é a absorção de água, em porcentagem.

4.6.7 PERDA DE MASSA APÓS A IMERSÃO

Após a pesagem dos blocos saturados, eles foram novamente secos nas mesmas condições (ao ar, 24h a 120°C) e, após o resfriamento, foram novamente pesados. Os valores de perda de massa, expressos em porcentagem, foram obtidos de acordo com a Equação 4.2.

$$P_i = \left(\frac{M_{1s} - M_{2s}}{M_{1s}} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

M_{1s} é a massa do bloco após a primeira secagem (g);

M_{2s} é a massa do bloco após a segunda secagem (g);

P_i é a perda de massa por imersão, em porcentagem.

4.6.8 DENSIDADE

A densidade dos blocos foi determinada por meio de cálculo geométrico. Através da pesagem das peças determinou-se a massa seca em gramas. O dimensionamento das peças permitiu o cálculo de seu volume em centímetros cúbicos. Assim a densidade em gramas/centímetro cúbico foi obtida através da Equação 4.3.

$$Densidade = \frac{M_s}{V} \quad (4.3)$$

onde M_s é a massa seca do bloco (após a secagem em estufa) e V é o volume do bloco (comprimento x largura x espessura).

4.6.9 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão dos blocos produzidos durante os testes preliminares, intermediários e finais foi determinada por meio de ensaios realizados no Laboratório de Cimentação (LABCIM) do Serviço de Gerência de Rejeitos do CDTN. Para o ensaio dos blocos provenientes dos testes preliminares e intermediários utilizou-se uma prensa manual (marca EMIC, modelo PCM 100/20). Antes de cada ensaio, foi realizada a medição geométrica dos blocos (comprimento e largura) e em seguida, estes passaram pelo processo de capeamento com enxofre (FIG.4.6) para ajustar o paralelismo entre as faces de maior área. Finalmente, cada bloco foi submetido a uma carga de maneira gradativa e crescente (FIG.4.7).



Figura 4.6 – Blocos capeados com enxofre.



Figura 4.7 – Bloco inserido na prensa para ensaio de compressão.

Já para a determinação da resistência à compressão dos blocos dos testes finais, utilizou-se uma prensa automática (marca EMIC, modelo PC 150/200I) e os procedimentos de ensaio propostos pela NBR 6460 (ABNT, 1983b), conforme recomenda a NBR 7170 (ABNT, 1983a).

Primeiramente, para a realização do ensaio, foram obtidos corpos de prova, com medidas aproximadas de 85mm de comprimento, 45mm de largura e 22,50mm de espessura, por meio de corte dos blocos utilizando-se uma serra circular. Trinta corpos de prova foram retirados a partir de 15 blocos, sendo dois corpos de prova provenientes de um mesmo bloco. Os corpos de prova foram, também, capeados com enxofre.

As medições individuais de comprimento e largura dos corpos de prova foram realizadas com paquímetro digital (marca Mitutoyo, modelo: 500-196-30B) e em seguida,

cada corpo de prova foi acondicionado em um saco plástico para evitar a deposição de material após cada ensaio.

O ensaio consistiu em colocar o corpo de prova sobre um apoio metálico, que abrangeu toda a face de trabalho inferior, ajustar o cabeçote de compressão por meio de rosca manual até tocar a face superior da amostra e aplicar uma carga crescente à taxa constante de 500N/s (FIG.4.8 e 4.9). Após o ensaio, o limite de resistência à compressão (RC) foi obtido pela Equação 4.4.

$$RC = \frac{\text{Carga Máxima}(N)}{\text{Área média da face de trabalho (m}^2\text{)}} \quad (4.4)$$



Figura 4.8 – Prensa automática utilizada nos ensaios de compressão.

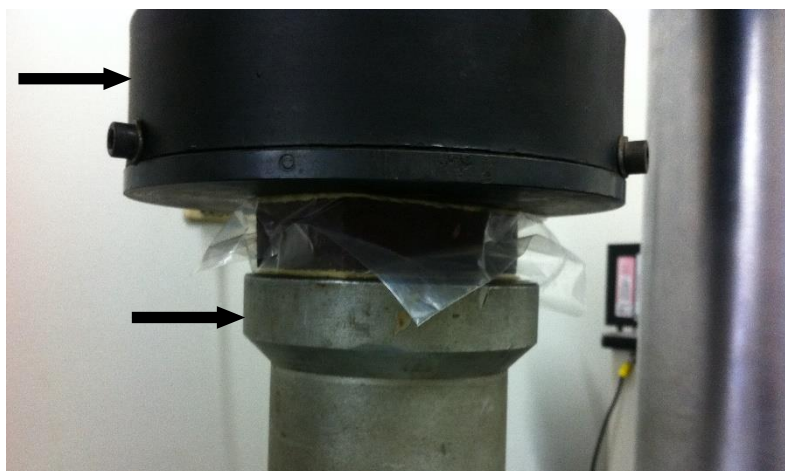


Figura 4.9 – Detalhe do corpo-de-prova inserido na prensa: cabeçote de compressão (veja seta superior) e apoio metálico (veja seta inferior).

4.6.10 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A resistência à flexão dos blocos foi determinada por meio do ensaio de flexão em três pontos realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do CDTN, utilizando-se a máquina universal de ensaio mecânicos (marca Instron, modelo 5882) e os procedimentos de ensaio propostos pela NBR 13818 (ABNT, 1997), conforme recomenda a NBR 9457 (ABNT, 2013).

O ensaio consistiu inicialmente em posicionar cada bloco sobre um aparelho metálico com dois apoios cilíndricos de diâmetro 35mm, com distância de 154,42mm entre eles, de forma que a saliência da amostra para fora de cada apoio era de 16,5mm. Em seguida foi aplicada uma carga crescente à taxa constante de 1mm/min por meio de um punção metálico cilíndrico de diâmetro 24,25mm posicionado no centro da amostra (FIG.4.10).

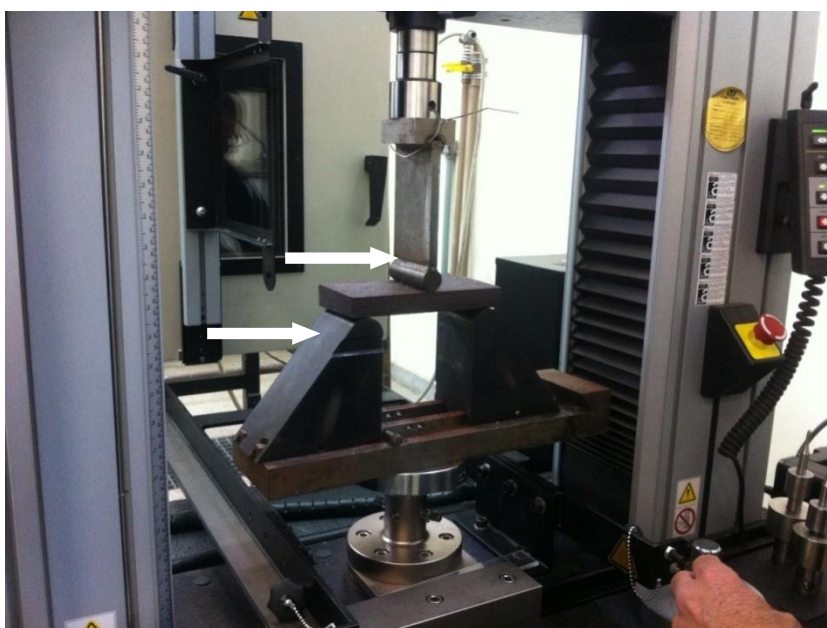


Figura 4.10 – Máquina universal de ensaios mecânicos: bloco, aparelho metálico (veja seta inferior) e punção (veja seta superior) durante ensaio de flexão.

Foram ensaiados 15 blocos considerando os valores médios de largura e espessura, respectivamente, iguais a 86,50mm e 22,00mm. A carga de ruptura e o módulo de resistência à flexão foram obtidos pelas Equações 4.5 e 4.6.

$$CR = \frac{F \times L}{b} \quad (4.5)$$

$$MRF = \frac{3F \times L}{2b \times e_{min}^2} \quad (4.6)$$

onde:

CR é a Carga de ruptura (N);

F é a força de ruptura (N);

L é a distância entre as barras de apoio (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

MRF é o módulo de resistência à flexão (MPa);

e_{min} é a espessura mínima do corpo de prova (mm).

4.6.11 ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A Espectroscopia por Infravermelho (IV) permite identificar as espécies químicas presentes a partir da correspondência entre cada banda de absorção ou transmissão e o respectivo número de onda.

Para identificar as manchas brancas que apareceram nos blocos, foi recolhida uma amostra por raspagem cuidadosa da superfície do bloco e esta foi analisada pela técnica IV. O espectro de transmitância foi obtido após dispersão do material em KBr. A análise foi realizada no laboratório da Supervisão de Nanotecnologia e Combustível Nuclear (SENAN) do CDTN, utilizando-se um espectrofotômetro (marca ABB Bomem Inc, modelo MB 102) com resolução de 4cm⁻¹. A análise do espectro obtido foi baseada na comparação com espectros do banco de dados (*NIST Standard Reference Database 69: NIST Chemistry WebBook*) da biblioteca do *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das caracterizações do rejeito coletado em 2016, não mostraram diferenças significativas em relação aos resultados exibidos pelo rejeito coletado em dezembro de 2015. Portanto, neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das caracterizações realizadas em blocos obtidos durante as etapas de testes preliminares, intermediários e finais.

5.1 TESTES PRELIMINARES

Os resultados dos testes preliminares mostraram que a temperatura de tratamento térmico deveria ser superior a 650°C e que a pressão de compactação deveria ser de 2,4 MPa, uma vez que blocos obtidos em temperaturas abaixo de 650°C apresentaram manchas brancas (eflorescência) e blocos obtidos com pressão de compactação de 1,2MPa não apresentaram uma superfície bem consolidada. Os resultados desses testes foram utilizados para o planejamento dos testes intermediários, com determinação das faixas para os teores de barrilha, de umidade e das temperaturas de aquecimento.

5.2 TESTES INTERMEDIÁRIOS

O planejamento fatorial da Tabela 4.1 (página 29) foi executado em ordem aleatória, gerado com o auxílio do software Minitab 17. A seguir estão apresentados os resultados atingidos para cada uma das características analisadas nos blocos obtidos.

5.2.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 5.1 exibe os resultados obtidos para a resposta “absorção de água” a partir do planejamento fatorial 2^3 . Note nesta tabela, que a 2ª corrida na ordem padrão determinada pelo planejamento teve três réplicas e a 3ª corrida teve apenas uma réplica. O numeral ordinal entre parênteses representa a ordem de execução da corrida. Esse planejamento não é ortogonal, o que requer atenção quanto aos confundimentos entre os efeitos dos fatores. A Tabela 5.2 traz os resultados do cálculo dos efeitos dos fatores Barrilha, Umidade e Temperatura, como também de suas interações para a resposta absorção de água, obtidos com o auxílio do *software* Minitab 17. Os valores de inflação da variância (VIF) indicam que não há confundimentos significativos entre os efeitos calculados. No nível de confiança de 90% (usual para a construção civil), somente os efeitos da Barrilha, da Umidade e da interação entre a Barrilha e a Umidade (Barrilha*Umidade) são significativos. O aumento do teor de Barrilha tende a diminuir a absorção de água. O aumento do teor de Umidade também tende a diminuir a absorção de água. A interação Barrilha* Umidade tende a aumentar a absorção de água quando ambos os fatores estiverem no mesmo nível, mas tende a diminuir a absorção de água quando eles estiverem em níveis diferentes. Porém, considerando os valores dos efeitos de cada fator juntamente com a sua interação, a menor absorção de água, desejável quando se utilizar o produto fabricado com rejeito como tijolos ou ladrilhos, é obtida quando a Umidade está no nível alto. Esse fato pode ser constatado pelo modelo, conforme demonstra a Tabela 5.2 e a Equação 5.1. A Figura 5.1 mostra o gráfico cúbico para os efeitos, onde esse fato pode ser também verificado.

Tabela 5.1 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “absorção de água”.

Ordem padrão (Nº da corrida)	Barrilha	Umidade	Temperatura	Absorção de água (%)		
				1ª réplica	2ª réplica	
1ª	-1	-1	-1	26,49 (1ª)	25,86 (4ª)	
2ª	+1	-1	-1	27,66 (2ª)	19,45 (15ª)	21,26 (16ª)
3ª	-1	+1	-1	15,90 (13ª)	*	
4ª	+1	+1	-1	15,99 (7ª)	14,95 (8ª)	
5ª	-1	-1	+1	26,80 (3ª)	26,74 (11ª)	
6ª	+1	-1	+1	15,48 (5ª)	19,81 (10ª)	
7ª	-1	+1	+1	18,39 (12ª)	14,51 (14ª)	
8ª	+1	+1	+1	17,91 (6ª)	17,71 (9ª)	

Tabela 5.2 – Resultado do cálculo dos efeitos para a absorção de água a partir da Tabela 5.1, realizado com auxílio do Minitab 17.

Termo	Efeito	Coefficiente	Desvio-padrão do coeficiente	Valor de T	Valor de p	VIF
Constante		19,88	0,68	29,17	0,000	
Barrilha	-2,89	-1,45	0,68	-2,12	0,066	1,07
Umidade	-6,94	-3,47	0,68	-5,09	0,001	1,07
Temperatura	-0,41	-0,21	0,68	0,30	0,769	1,08
Barrilha*Umidade	3,36	1,68	0,68	2,47	0,039	1,08
Barrilha*Temperatura	-0,99	-0,49	0,68	-0,72	0,489	1,07
Umidade*Temperatura	1,86	0,93	0,68	1,36	0,210	1,07
Barrilha*Umidade*Temperatura	1,88	0,94	0,68	1,38	0,205	1,08

$$\text{Absorção de Água} = 19,88 - 1,45\text{Barrilha} - 3,47\text{Umidade} - 0,21\text{Temperatura} + 1,68\text{Barrilha} * \text{Umidade} - 0,49\text{Barrilha} * \text{Temperatura} + 0,93\text{Umidade} * \text{Temperatura} + 0,94\text{Barrilha} * \text{Umidade} * \text{Temperatura} \quad (5.1)$$

onde os termos contendo “*” significam as interações entre dois e três fatores. O desvio-padrão da regressão é 2,62, $R^2 = 84,25$ e $R^2_{\text{ajustado}} = 70,47\%$.

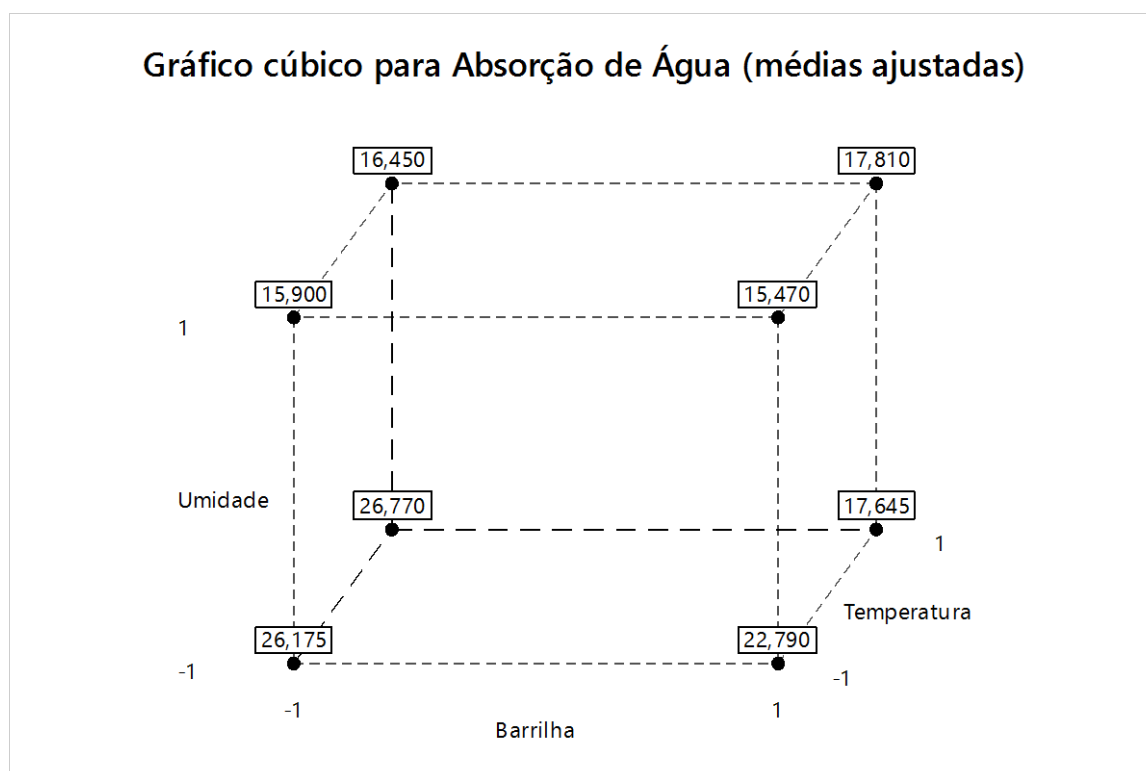


Figura 5.1 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.1 para a absorção de água (%) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).

5.2.2 DENSIDADE

A Tabela 5.3 registra os resultados alcançados para a resposta “densidade” a partir do planejamento fatorial 2^3 . Note nesta tabela, que a 2ª corrida na ordem padrão determinada pelo planejamento teve três réplicas e a 3ª corrida não teve resultados, porque o bloco não ficou íntegro para permitir as medidas das suas dimensões. O numeral ordinal entre parênteses representa a ordem de execução da corrida. Esse planejamento não é ortogonal, o que requer atenção quanto aos confundimentos entre os efeitos dos fatores. A Tabela 5.4 exhibe os resultados do cálculo dos efeitos dos fatores Barrilha, Umidade e Temperatura, como também de suas interações de 2ª ordem para a resposta densidade, obtidos com o auxílio do *software* Minitab 17. Todos os efeitos estão confundidos com a interação entre os três fatores. Os valores de inflação da variância (VIF) indicam que os confundimentos são pouco significativos. No nível de confiança de 90% (usual para a construção civil), somente o efeito da Umidade é significativo. A densidade tende a aumentar com o aumento da Umidade. É desejável, quando se utilizar os blocos produzidos como tijolos ou ladrilhos, uma densidade mais baixa, indicando a utilização do menor teor de Umidade. A Equação 5.2 traz o modelo ajustado. A Figura 5.2 mostra o gráfico cúbico para os efeitos, onde fica claro que as menores densidades são obtidas com o menor teor de Umidade.

Tabela 5.3 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “densidade”.

Ordem padrão	Barrilha	Umidade	Temperatura	Densidade (g/cm ³)		
				1ª réplica	2ª réplica	
1ª	-1	-1	-1	1,41 (1ª)	1,48 (4ª)	
2ª	+1	-1	-1	1,44 (2ª)	1,57 (15ª)	1,53 (16ª)
3ª	-1	+1	-1	* (13ª)		*
4ª	+1	+1	-1	1,60 (7ª)	2,02 (8ª)	
5ª	-1	-1	+1	1,52 (3ª)	1,51 (11ª)	
6ª	+1	-1	+1	1,68 (5ª)	1,60 (10ª)	
7ª	-1	+1	+1	1,87 (12ª)	1,99 (14ª)	
8ª	+1	+1	+1	1,70 (6ª)	2,05 (9ª)	

Tabela 5.4 – Resultado do cálculo dos efeitos para a densidade a partir da Tabela 5.3, realizado com auxílio do Minitab 17.

Termo	Efeito	Coefficiente	Desvio-padrão do coeficiente	Valor de T	Valor de p	VIF
Constante		1,71	0,05	32,99	0,000	
Barrilha	0,01	0,03	0,05	0,07	0,948	1,65
Umidade	0,36	0,18	0,05	3,59	0,007	1,65
Temperatura	0,07	0,03	0,05	0,65	0,532	1,87
Barrilha*Umidade	-0,09	-0,05	0,05	-0,87	0,410	1,87
Barrilha*Temperatura	0,03	0,01	0,05	0,29	0,782	1,65
Umidade*Temperatura	-0,03	-0,01	0,05	-0,31	0,764	1,65

$$\begin{aligned} \text{Densidade} = & 1,71 + 0,03\text{Barrilha} + 0,18\text{Umidade} + 0,03\text{Temperatura} - 0,04\text{Barrilha} * \\ & \text{Umidade} + 0,01\text{Barrilha} * \text{Temperatura} - 0,01\text{Umidade} * \text{Temperatura} \end{aligned} \quad (5.2)$$

onde os termos contendo “*” indicam as interações entre dois fatores. O desvio-padrão da regressão é 0,15, $R^2 = 73,82\%$ e $R^2_{\text{ajustado}} = 54,18\%$.

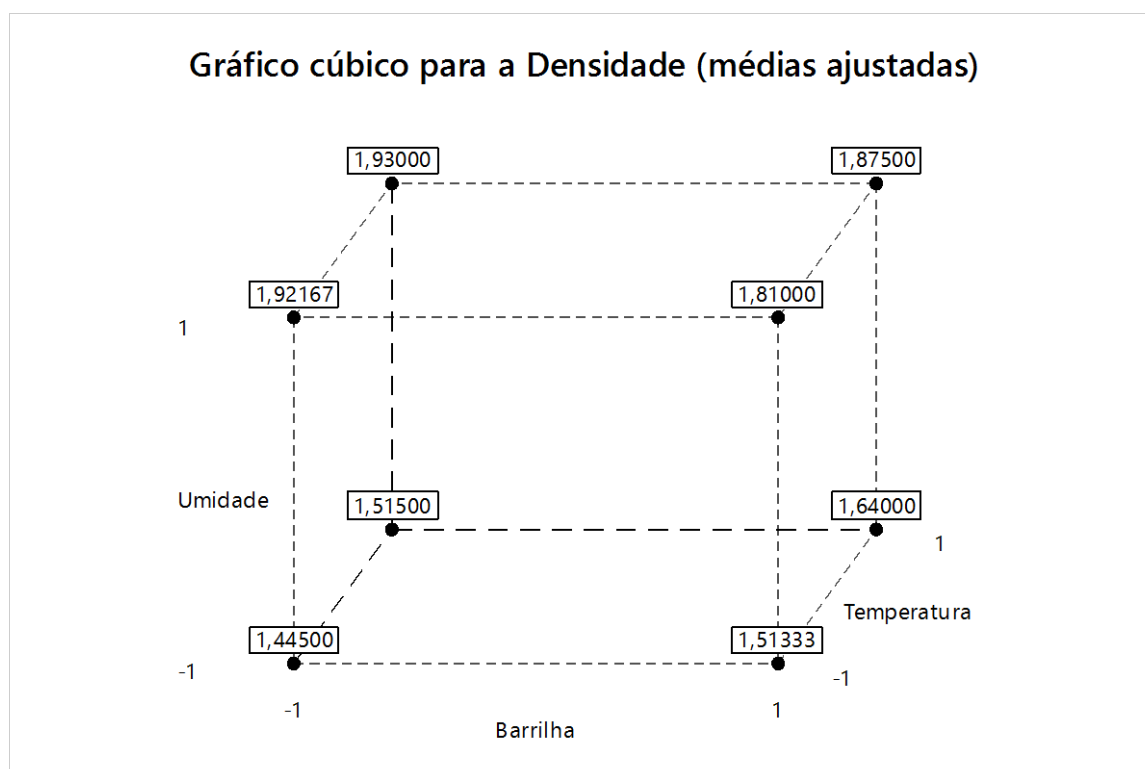


Figura 5.2 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.2 para a densidade (g/cm^3) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).

5.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 5.5 apresenta os resultados registrados para a resposta “resistência à compressão” a partir do planejamento fatorial 2^3 . Note nesta tabela, que a 2ª corrida na ordem padrão determinada pelo planejamento teve duas réplicas e a 3ª corrida não teve resultados, porque o bloco não ficou íntegro para permitir as medidas das suas dimensões. O numeral ordinal entre parênteses representa a ordem de execução da corrida. Esse planejamento não é ortogonal, o que requer atenção quanto aos confundimentos entre os efeitos dos fatores. A Tabela 5.6 expõe os resultados do cálculo dos efeitos dos fatores Barrilha, Umidade e Temperatura, como também de suas interações de 2ª ordem para a resposta resistência à compressão, obtidos com o auxílio do *software* Minitab 17. Todos os efeitos estão confundidos com a interação entre os três fatores. Os valores de inflação da variância (VIF) indicam que os confundimentos são pouco significativos. No nível de confiança de 90% (usual para a construção civil), somente o efeito da Barrilha é significativo. A resistência à compressão tende a aumentar com o aumento do teor de Barrilha. É desejável, quando se utilizar o produto desenvolvido com rejeito como tijolos ou ladrilhos, uma resistência à compressão mais alta, indicando a utilização do maior teor de Barrilha. A Equação 5.3 traz o modelo ajustado. A Figura 5.3 mostra o gráfico cúbico para os efeitos, onde fica claro que as maiores resistências à compressão são obtidas com o maior teor de Barrilha.

Tabela 5.5 – Resultado do planejamento fatorial 2^3 para a resposta “resistência à compressão” (RC).

Ordem padrão	Barrilha	Umidade	Temperatura	RC (MPa)		
				1ª réplica		2ª réplica
1ª	-1	-1	-1	1,8 (1ª)		0,7 (4ª)
2ª	+1	-1	-1	*(2ª)	5,6 (15ª)	6,8 (16ª)
3ª	-1	+1	-1	* (13ª)		*
4ª	+1	+1	-1	4,8 (7ª)		7,1 (8ª)
5ª	-1	-1	+1	0,7 (3ª)		0,4 (11ª)
6ª	+1	-1	+1	3,4 (5ª)		4,6 (10ª)
7ª	-1	+1	+1	1,4 (12ª)		7,8 (14ª)
8ª	+1	+1	+1	3,5 (6ª)		8,1 (9ª)

Tabela 5.6 – Resultado do cálculo dos efeitos para a resistência à compressão a partir da Tabela 5.5, realizado com auxílio do Minitab 17.

Termo	Efeito	Coefficiente	Desvio-padrão do coeficiente	Valor de T	Valor de p	VIF
Constante		3,95	0,80	4,94	0,002	
Barrilha	3,08	1,54	0,80	1,92	0,096	1,71
Umidade	1,90	0,95	0,80	1,19	0,273	1,71
Temperatura	-0,43	-0,21	0,80	-0,27	0,798	1,71
Barrilha*Umidade	-1,13	-0,56	0,80	-0,70	0,504	1,71
Barrilha*Temperatura	-0,75	-0,38	0,80	-0,47	0,653	1,71
Umidade*Temperatura	1,03	0,51	0,80	0,64	0,542	1,71

$$RC = 3,95 + 1,54Barrilha + 0,95Umidade - 0,21Temperatura - 0,56Barrilha * Umidade - 0,38Barrilha * Temperatura + 0,51Umidade * Barrilha \quad (5.3)$$

onde os termos contendo “*” indicam as interações entre dois fatores. O desvio-padrão da regressão é 2,26, $R^2 = 63,91\%$ e $R^2_{ajustado} = 32,97\%$.

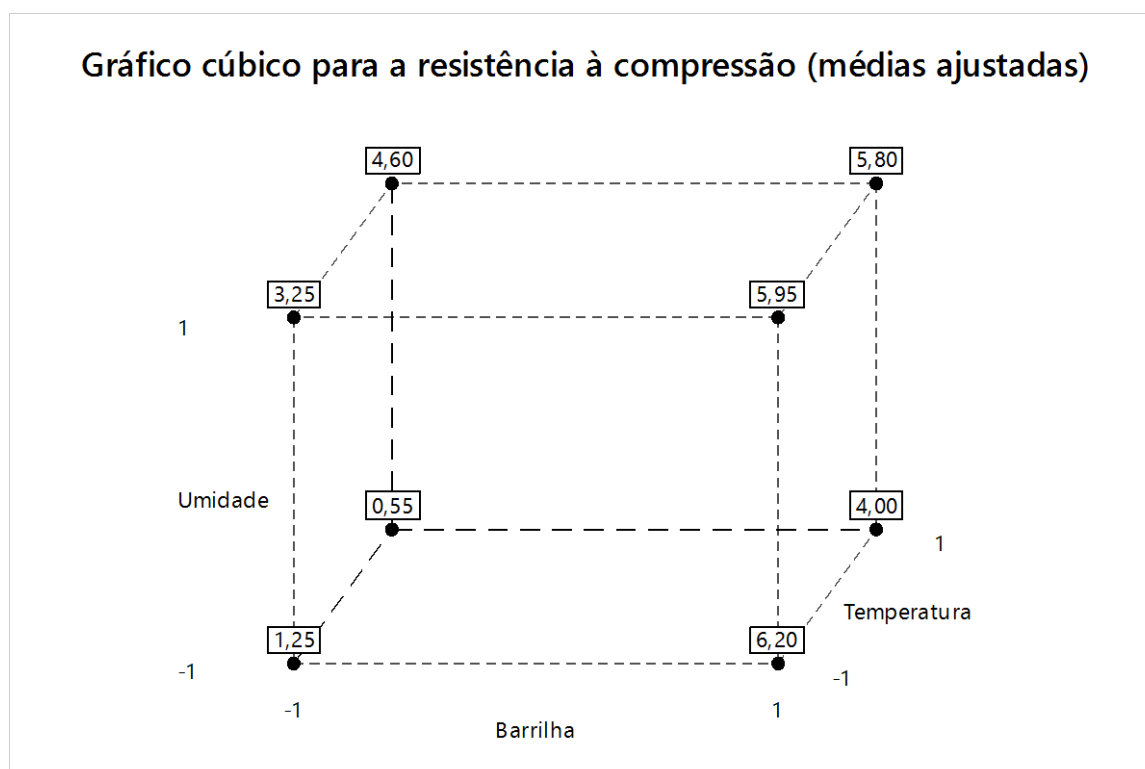


Figura 5.3 – Gráfico cúbico dos valores ajustados pelo modelo da Equação 5.3 para a resistência à compressão (MPa) dos blocos obtidos com o rejeito de Candonga (testes intermediários).

5.2.4 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DOS TESTES INTERMEDIÁRIOS

A Tabela 5.7 sintetiza os efeitos observados dos fatores Barrilha, Umidade e Temperatura, como também de suas interações de 2ª ordem para cada uma das características analisadas nos testes intermediários. O efeito do teor de água pode ser explicado pela maior facilidade em realizar a homogeneização para obtenção da mistura causada pela água, que molha a superfície de um maior número de partículas de quartzo com a solução de carbonato de sódio e produz maior quantidade de fase vítrea com menos poros. Com uma solução mais concentrada de carbonato de sódio, era esperado que mais fase vítrea fosse formada. Algo que chamou a atenção foi o fato da temperatura e as suas interações não apresentarem efeitos significativos. A diferença entre os níveis baixo (800°C) e alto (900°C) é de 100°C, o que é suficiente para causar algum efeito. Esse fato mereceu uma análise mais profunda.

Tabela 5.7 – Efeitos observados nos testes intermediários.

O aumento do teor de	Absorção de água	Densidade	Resistência à compressão
Barrilha	Diminui	Sem efeito	Aumenta
Umidade	Diminui	Aumenta	Sem efeito
Temperatura	Sem efeito	Sem efeito	Sem efeito
Interações			
Barrilha*Umidade	Sinérgica	Sem efeito	Sem efeito
Barrilha*Temperatura	Sem efeito	Sem efeito	Sem efeito
Umidade*Temperatura	Sem efeito	Sem efeito	Sem efeito

Foi observado em uma seção transversal fraturada dos blocos que a região mais externa apresenta uma cor mais escura, enquanto na região central a cor é mais clara e amarronzada (FIG.5.4, veja setas brancas). Nesta região, os blocos também ficam mais fragilizados, em alguns casos inclusive sob uma simples fricção com o dedo a região solta pequenas partículas na forma de pó. Foi feita uma difração de raios X de uma amostra da borda e da região central de um bloco tratado a 900°C (FIG.5.5). A composição delas é praticamente a mesma, porém nota-se a presença de mais material amorfo na região da borda. Isso parece indicar que houve migração do material vítreo para a superfície do bloco, deixando a região central mais fragilizada. Esse efeito poderia ser uma explicação para a falta de influência da temperatura nos resultados mostrados na Tabela 5.7.

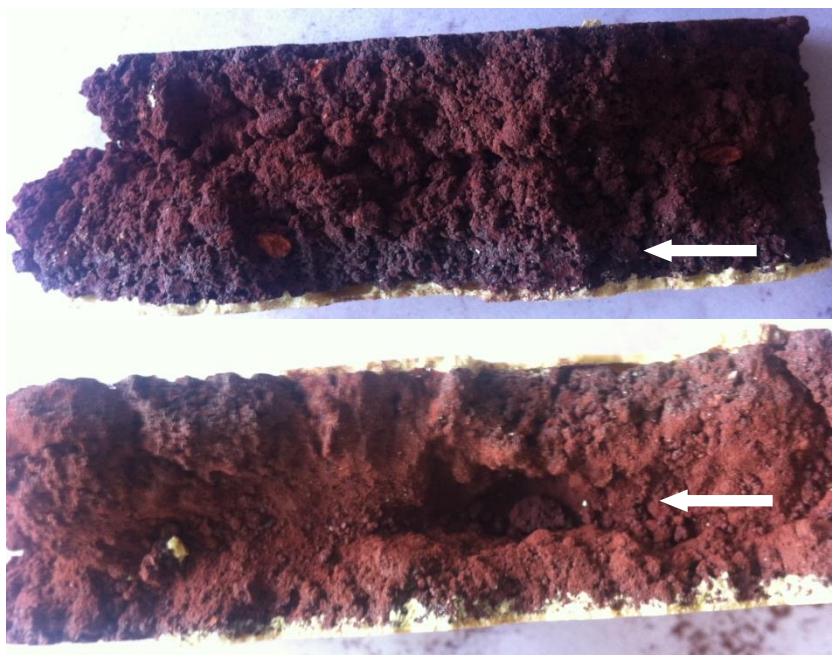


Figura 5.4 – Seção transversal fraturada dos blocos: uma camada vítrea na região mais externa pode ser visualizada (veja seta superior), enquanto a região interna (veja seta inferior) não apresenta aspecto vítreo.

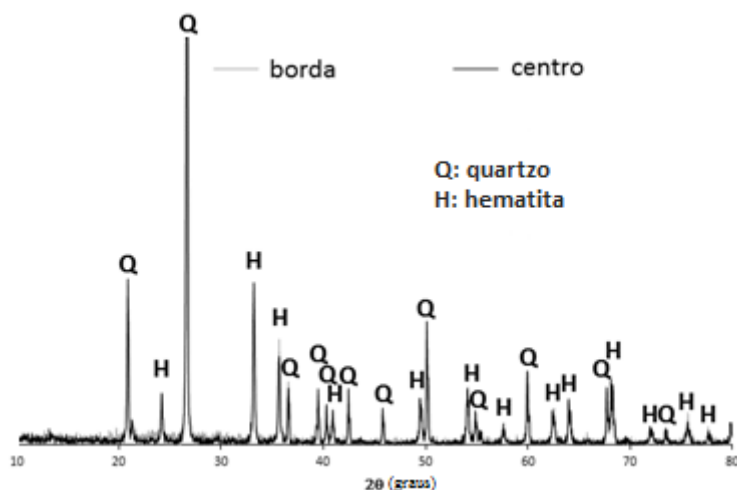


Figura 5.5 – Comparação entre dois difratogramas de raios X: da região central e da borda de um bloco tratado a 900°C.

Para atenuar esse fenômeno e evitar a eflorescência observada com tratamentos em temperaturas de 600 e 650°C, os testes finais foram realizados a 700°C. O teor de barrilha foi fixado em 5% para obterem-se blocos mais resistentes à compressão (vide Tabela 5.7). O teor de umidade foi fixado em 13%. Embora os testes intermediários tenham indicado que o maior teor de umidade produziu blocos com menor absorção de água, com a esperada atenuação da migração do material vítreo para a superfície com o tratamento a 700°C, espera-se que a absorção de água deva diminuir, pois a parte central dos blocos ficará menos porosa. O menor

teor de umidade deve produzir também blocos um pouco menos densos. Além disso, a desmoldagem do bloco prensado é mais fácil no teor de água de 13%.

5.3 TESTES FINAIS

Foram produzidos trinta blocos nas seguintes condições: teor de barrilha = 5%, teor de umidade = 13%, tratamento térmico = 10°C/min com patamar de 2h a 700°C, com desligamento do forno após 2h de patamar. Os blocos foram retirados do forno quando atingiram a temperatura ambiente. Cada bloco foi uma réplica, produzida individualmente em dias diferentes, com a repetição do procedimento de obtenção desde as pesagens da matéria prima, misturas, prensagens e tratamentos térmicos.

Os blocos foram caracterizados quanto à inspeção visual, absorção de água, perda de massa após a imersão em água, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, avaliação microestrutural através de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada com espectroscopia por dispersão de raios X (EDS). Foi realizada ainda espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) no material coletado das manchas brancas presentes nos blocos.

5.3.1 INSPEÇÃO VISUAL

A Tabela 5.8 registra o resultado da inspeção visual. Nota-se que a maioria dos blocos apresentou eflorescências em diferentes graus no lado que ficou na parte mais externa do forno. Isso pode ser devido a um gradiente térmico dentro do forno, que expôs o bloco a temperaturas inferiores a 700°C nessa região, causando a eflorescência. As peças, em graus diferentes, possuíam algumas trincas, mas apresentaram boa consistência. As Figuras 5.6 e 5.7 mostram algumas fotos dos blocos com as características observadas.

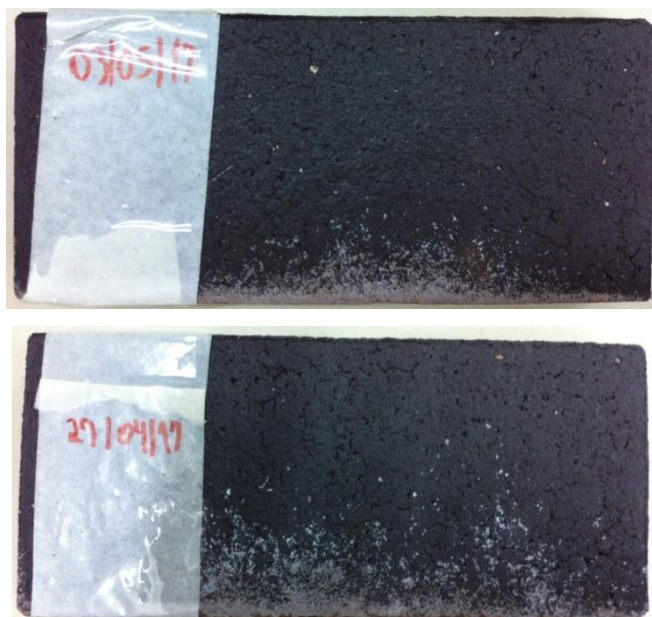


Figura 5.6 – Blocos tratados a 700°C com diferentes graus de eflorescência.



Figura 5.7 – Bloco tratado a 700°C com presença de trincas.

Tabela 5.8 – Resultado da inspeção visual dos blocos obtidos nos testes finais.

Bloco N°	Inspeção visual
1	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas nas faces laterais um pouco maiores que na face superior, pequenos poros nas faces superior e laterais, presença de pequenas pedras oriundas do rejeito. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência numa parte da superfície.
2	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas nas faces laterais um pouco maiores que na face superior, trincas mais finas na face inferior e pequenos poros nas faces superior e laterais. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência numa parte da superfície.
3	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas e poros nas laterais um pouco maiores que na face superior, pequenas trincas na face inferior. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência na face lateral com cor avermelhada (provavelmente exposta a uma temperatura mais baixa por ter ficado voltada para a porta do forno durante a queima).
4	Peça com alguns vazios pequenos na face superior, muitos vazios e trincas, alguns profundos, em todas as faces laterais próximas ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com muitos vazios e trincas (provável problema durante prensagem). Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência na face lateral com cor avermelhada.
5	Peça com poros e trincas médios na face superior, presença também de poros pequenos. Poros pequenos e médios nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Trincas e vazios pequenos na face inferior. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio.

6	Peça com poros e trincas pequenos na face superior, presença também de poros médios. Poros e trincas pequenos nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Poros pequenos e alguns médios na face inferior. Grande presença de eflorescência.
7	Peça com poros e trincas pequenos e médios na face superior. Poros e trincas pequenos nas faces laterais em seu encontro com a face inferior, alguns deles eram mais profundos. Trincas pequenas na face inferior. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio. Face lateral avermelhada com pouca presença de eflorescência.
8	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e algumas pedras. Poros pequenos nas faces laterais em pouca quantidade. Poros e trincas pequenos na face inferior em pouquíssima quantidade. Face lateral avermelhada com pouca presença de eflorescência. Eflorescência na forma de pontos brancos isolados e dispersos.
9	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior. Poros e trincas pequenas nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Poros pequenos e algumas trincas médias e finas na face inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência nas faces superior e lateral.
10	Peça com poucos poros e trincas de tamanho médio na face superior. Muitos poros e poucas trincas médias nas faces laterais. Face inferior com grande quantidade de vazios, muitos poros e algumas trincas. Face lateral avermelhada. Grande presença de eflorescência nas faces superior e lateral.
11	Peça com muitos poros e trincas pequenos na face superior. Poros e trincas pequenas nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Face inferior com grande quantidade de poros muito pequenos. Face lateral avermelhada. Pouquíssima presença de eflorescência.
12	Pouquíssimos poros e trincas pequenos na face superior e nas laterais em sua parte inferior. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros e algumas trincas médias e muito finas. Face lateral avermelhada e pouca presença de eflorescência.
13	Poucos poros pequenos e trincas de tamanho médio na face superior e nas laterais. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros e trincas muito finas. Face lateral avermelhada e pouca presença de eflorescência.
14	Peça com muitos poros e trincas médios na face superior e laterais. Face inferior com grande quantidade de poros pequenos e algumas trincas pequenas e médias de espessura fina. Face lateral avermelhada. Pouquíssima presença de eflorescência.
15	Poucos poros pequenos e médios, e pequenas trincas de espessura média na face superior. Poucos poros pequenos e médios nas laterais. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros. Face lateral avermelhada e muita presença de eflorescência.
16	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com grande quantidade de poros e poucas trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
17	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com pequena quantidade de trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
18	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior. Poucas trincas pequenas e finas, e de tamanho médio e espessura média nas laterais. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas de tamanho pequeno e médio. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
19	Peça com grande quantidade de poros e trincas pequenos na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais, próximo ao seu encontro com a face inferior, presença de uma trinca de espessura média e mais profunda. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas de tamanho pequeno e um vazio pequeno.
20	Peça com grande quantidade de poros e trincas pequenos na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais, próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
21	Peça com grande quantidade de pequenos poros e trincas pequenas e finas na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais. Face inferior com pequena quantidade de trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
22	Pequena quantidade de pequenos poros e trincas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas muito finas nas faces laterais e inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
23	Pequena quantidade de pequenos poros e trincas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas muito finas nas faces laterais e inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
24	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas pequenas e finas na face superior. Pequena quantidade de pequenas trincas de espessura fina nas laterais e presença de uma pedra. Face inferior com pequena quantidade de pequenas trincas de espessura fina. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
25	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas pequenas de espessura fina e média na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas de espessura fina nas laterais. Face inferior com pouquíssimas trincas de espessura muito fina. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
26	Peça com pequenos poros e pequenas trincas finas em pequena quantidade na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Presença de um "dente" em uma lateral. Face inferior com pequena

	quantidade de trincas pequenas e finas, e uma trinca grande e fina. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
27	Grandes vazios em pequena quantidade e poucas trincas pequenas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenos poros e pequenas trincas finas na face lateral. Face inferior com média quantidade de pequenos poros e trincas pequenas de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Presença em média quantidade de eflorescência.
28	Pouquíssima quantidade de pequenos poros e pequenas trincas muito finas na face superior, laterais e face inferior. Face lateral avermelhada. Presença em pouquíssima quantidade de eflorescência. Peça com melhor qualidade visual entre todas.
29	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas de tamanho pequeno e médio de espessura fina na face superior. Poucos poros pequenos e trincas pequenas de espessura fina e média nas laterais. Face inferior com poucas trincas pequenas e médias de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Pequenas manchas de eflorescência.
30	Pequena quantidade de pequenos poros e pequenas trincas finas na face superior. Poucas trincas pequenas e finas, uma trinca de espessura média mais profunda na face lateral. Face inferior com poucas trincas pequenas e médias de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Presença de manchas de eflorescência.

5.3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados para a absorção de água estão apresentados na Tabela 5.9. Como esperado, os valores estão menores que aqueles aferidos nos testes intermediários (vide seção 5.2.1), variando de 12 a 16%. Entretanto, os dados não seguem uma distribuição normal, conforme demonstrado no histograma da Figura 5.8 e no teste para normalidade de Anderson-Darling, exibido na Figura 5.9. Esse fato é indicativo de que algum fator está influenciando a distribuição dos valores de absorção de água, além dos erros experimentais aleatórios.

Tabela 5.9 – Resultados de absorção de água dos blocos dos testes finais.

Bloco Nº	Abs. Água (%)	Corrida	Abs. Água (%)	Bloco Nº	Abs. Água (%)
1	13,64	11	13,33	21	14,33
2	12,60	12	13,72	22	14,52
3	12,47	13	13,76	23	15,17
4	12,63	14	12,47	24	14,07
5	12,33	15	14,57	25	16,33
6	12,13	16	14,21	26	12,12
7	11,89	17	11,78	27	12,09
8	11,82	18	12,25	28	11,85
9	12,24	19	13,50	29	13,02
10	12,76	20	14,80	30	12,61

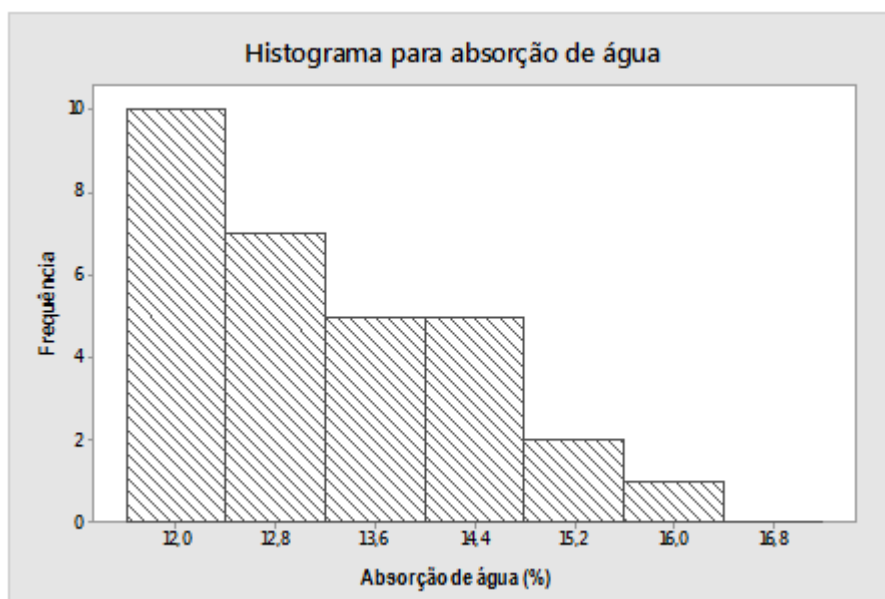


Figura 5.8 – Histograma mostrando a distribuição dos valores de absorção de água dos blocos dos testes finais.

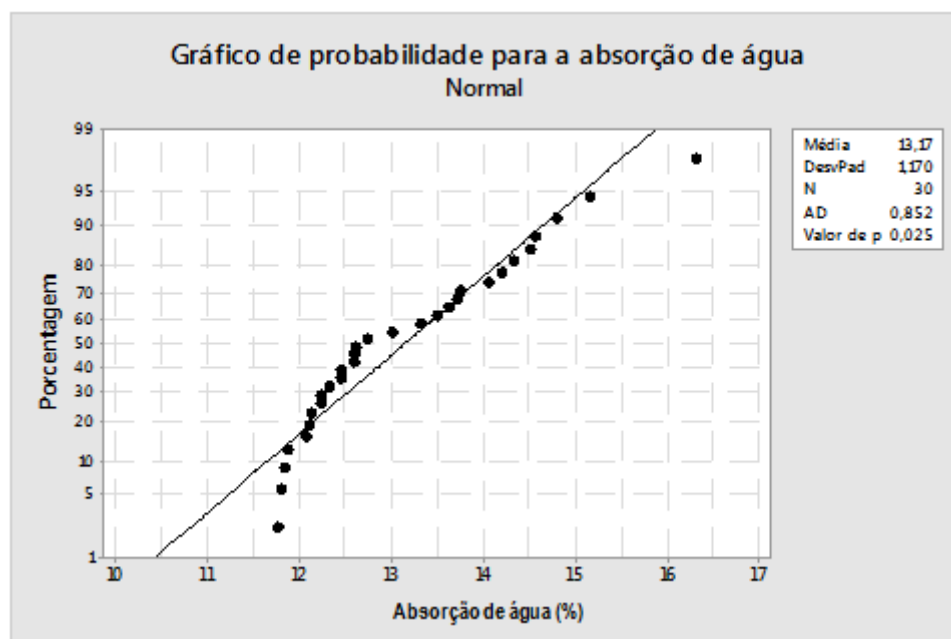


Figura 5.9 – Teste para normalidade para os valores de absorção de água dos blocos dos testes finais.

A Tabela 5.10 mostra como os valores da absorção de água se correlacionam com os resultados da inspeção visual. Nela os valores de absorção de água estão em ordem crescente. Nota-se que, em geral, quanto maior a quantidade de poros e trincas observados, maior é a absorção de água apresentada pelo bloco. A Figura 5.10 traz uma seção transversal típica dos blocos. Pode-se ver que há uma camada externa, que é mais escura e mais coesa, e uma camada interna de coloração mais clara, que pode ser parcialmente removida por meio de atrito com o dedo. Ao que parece, essa região menos coesa contribui com maior peso para a

absorção de água. Havendo mais poros e trincas ela pode estar mais conectada à superfície do bloco, contribuindo para o aumento da absorção de água.

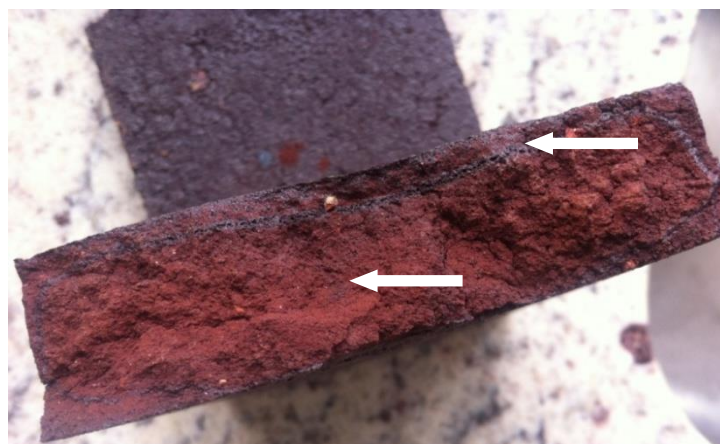


Figura 5.10 – Seção transversal típica dos blocos: camada externa mais escura e coesa (veja seta superior), no centro a camada é mais clara e menos coesa (veja seta inferior).

Tabela 5.10 – Relação da absorção de água com a inspeção visual dos blocos dos testes finais.

Bloco Nº	Abs. Água (%)	Inspeção visual
17	11,78	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com pequena quantidade de trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
8	11,82	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e algumas pedras. Poros pequenos nas faces laterais em pouca quantidade. Poros e trincas pequenos na face inferior em pouquíssima quantidade. Face lateral avermelhada com pouca presença de eflorescência. Eflorescência na forma de pontos brancos isolados e dispersos.
28	11,85	Pouquíssima quantidade de pequenos poros e pequenas trincas muito finas na face superior, laterais e face inferior. Face lateral avermelhada. Presença em pouquíssima quantidade de eflorescência. Peça com melhor qualidade visual entre todas.
7	11,89	Peça com poros e trincas pequenos e médios na face superior. Poros e trincas pequenos nas faces laterais em seu encontro com a face inferior, alguns deles eram mais profundos. Trincas pequenas na face inferior. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio. Face lateral avermelhada com pouca presença de eflorescência.
27	12,09	Grandes vazios em pequena quantidade e poucas trincas pequenas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenos poros e pequenas trincas finas na face lateral. Face inferior com média quantidade de pequenos poros e trincas pequenas de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Presença em média quantidade de eflorescência.
26	12,12	Peça com pequenos poros e pequenas trincas finas em pequena quantidade na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Presença de um "dente" em uma lateral. Face inferior com pequena quantidade de trincas pequenas e finas, e uma trinca grande e fina. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
6	12,13	Peça com poros e trincas pequenos na face superior, presença também de poros médios. Poros e trincas pequenos nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Poros pequenos e alguns médios na face inferior. Grande presença de eflorescência.

9	12,24	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior. Poros e trincas pequenas nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Poros pequenos e algumas trincas médias e finas na face inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência nas faces superior e lateral.
18	12,25	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior. Poucas trincas pequenas e finas, e de tamanho médio e espessura média nas laterais. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas de tamanho pequeno e médio. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
5	12,33	Peça com poros e trincas médios na face superior, presença também de poros pequenos. Poros pequenos e médios nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Trincas e vazios pequenos na face inferior. Houve arrancamento de material da face inferior que ficou agarrado na placa de apoio.
3	12,47	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas e poros nas laterais um pouco maiores que na face superior, pequenas trincas na face inferior. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência na face lateral com cor avermelhada (provavelmente exposta a uma temperatura mais baixa por ter ficado voltada para a porta do forno durante a queima).
14	12,47	Peça com muitos poros e trincas médios na face superior e laterais. Face inferior com grande quantidade de poros pequenos e algumas trincas pequenas e médias de espessura fina. Face lateral avermelhada. Pouquíssima presença de eflorescência.
2	12,60	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas nas faces laterais um pouco maiores que na face superior, trincas mais finas na face inferior e pequenos poros nas faces superior e laterais. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência numa parte da superfície.
30	12,61	Pequena quantidade de pequenos poros e pequenas trincas finas na face superior. Poucas trincas pequenas e finas, uma trinca de espessura média mais profunda na face lateral. Face inferior com poucas trincas pequenas e médias de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Presença de manchas de eflorescência.
4	12,63	Peça com alguns vazios pequenos na face superior, muitos vazios e trincas, alguns profundos, em todas as faces laterais próximas ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com muitos vazios e trincas (provável problema durante prensagem). Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando vértices bem definidos e presença de eflorescência na face lateral com cor avermelhada.
10	12,76	Peça com poucos poros e trincas de tamanho médio na face superior. Muitos poros e poucas trincas médias nas faces laterais. Face inferior com grande quantidade de vazios, muitos poros e algumas trincas. Face lateral avermelhada. Grande presença de eflorescência nas faces superior e lateral.
29	13,02	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas de tamanho pequeno e médio de espessura fina na face superior. Poucos poros pequenos e trincas pequenas de espessura fina e média nas laterais. Face inferior com poucas trincas pequenas e médias de espessura fina e média. Face lateral avermelhada. Pequenas manchas de eflorescência.
11	13,33	Peça com muitos poros e trincas pequenos na face superior. Poros e trincas pequenas nas faces laterais em seu encontro com a face inferior. Face inferior com grande quantidade de poros muito pequenos. Face lateral avermelhada. Pouquíssima presença de eflorescência.
19	13,50	Peça com grande quantidade de poros e trincas pequenos na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais, próximo ao seu encontro com a face inferior, presença de uma trinca de espessura média e mais profunda. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas de tamanho pequeno e um vazio pequeno.
1	13,64	Pequenas trincas na face superior, muitas trincas nas faces laterais um pouco maiores que na face superior, pequenos poros nas faces superior e laterais, presença de pequenas pedras oriundas do rejeito. Peça íntegra sem soltar pequenas partículas na forma de pó em contato com as mãos, apresentando

		vértices bem definidos e presença de eflorescência numa parte da superfície.
12	13,72	Pouquíssimos poros e trincas pequenos na face superior e nas laterais em sua parte inferior. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros e algumas trincas médias e muito finas. Face lateral avermelhada e pouca presença de eflorescência.
13	13,76	Poucos poros pequenos e trincas de tamanho médio na face superior e nas laterais. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros e trincas muito finas. Face lateral avermelhada e pouca presença de eflorescência.
24	14,07	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas pequenas e finas na face superior. Pequena quantidade de pequenas trincas de espessura fina nas laterais e presença de uma pedra. Face inferior com pequena quantidade de pequenas trincas de espessura fina. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
16	14,21	Peça com poucos poros e trincas pequenos na face superior e laterais próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com grande quantidade de poros e poucas trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
21	14,33	Peça com grande quantidade de pequenos poros e trincas pequenas e finas na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais. Face inferior com pequena quantidade de trincas pequenas e finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
22	14,52	Pequena quantidade de pequenos poros e trincas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas muito finas nas faces laterais e inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
15	14,57	Poucos poros pequenos e médios, e pequenas trincas de espessura média na face superior. Poucos poros pequenos e médios nas laterais. Face inferior com grande quantidade de pequenos poros. Face lateral avermelhada e muita presença de eflorescência.
20	14,80	Peça com grande quantidade de poros e trincas pequenos na face superior. Pequenos poros e trincas em pequena quantidade nas laterais, próximo ao seu encontro com a face inferior. Face inferior com pequena quantidade de trincas finas. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
23	15,17	Pequena quantidade de pequenos poros e trincas de espessura fina na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas muito finas nas faces laterais e inferior. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.
25	16,33	Grande quantidade de poros pequenos e médios e trincas pequenas de espessura fina e média na face superior. Pouquíssima quantidade de pequenas trincas de espessura fina nas laterais. Face inferior com pouquíssimas trincas de espessura muito fina. Face lateral avermelhada. Pouca presença de eflorescência.

5.3.3 PERDA DE MASSA APÓS A IMERSÃO

Este teste foi realizado para verificar se os blocos apresentam perda de massa quando submersos em água, uma vez que havia a preocupação quanto à solubilidade da fase vítrea formada pela reação da barrilha com o quartzo. A Tabela 5.11 exibe os resultados obtidos. A análise dos dados exibidos nesta tabela mostra que não houve perda significativa de massa dos blocos.

Tabela 5.11 – Perda de massa dos blocos dos testes finais, obtida pela secagem dos blocos após o teste de absorção de água.

Bloco N°	Perda de massa (%)	Bloco N°	Perda de massa (%)	Bloco N°	Perda de massa (%)
1	Não detectada	11	Não detectada	21	0,01
2	Não detectada	12	0,03	22	-0,01
3	Não detectada	13	Não detectada	23	0,01
4	Não detectada	14	0,07	24	0,01
5	Não detectada	15	-0,01	25	0,03
6	Não detectada	16	0,01	26	-0,01
7	Não detectada	17	0,03	27	-0,04
8	Não detectada	18	0,01	28	0,03
9	0,04	19	-0,01	29	0,01
10	0,01	20	0,01	30	0,03

5.3.4 DENSIDADE

Os resultados para a densidade dos blocos dos testes finais estão registrados na Tabela 5.12. Eles seguem uma distribuição normal, conforme demonstrado no histograma da Figura 5.11 e no teste para normalidade de Anderson-Darling apresentado na Figura 5.12. Calcula-se uma densidade de $1,95 \pm 0,03\text{g/cm}^3$ com 95% de probabilidade.

Tabela 5.12 – Densidade dos blocos dos testes finais.

Bloco N°	Densidade (g/cm ³)	Bloco N°	Densidade (g/cm ³)	Bloco N°	Densidade (g/cm ³)
1	1,94	11	1,95	21	1,87
2	2,08	12	1,90	22	1,86
3	1,94	13	1,95	23	1,82
4	2,04	14	2,02	24	1,92
5	1,95	15	1,88	25	1,80
6	1,97	16	1,86	26	1,95
7	2,01	17	1,96	27	1,99
8	2,00	18	1,97	28	1,99
9	2,03	19	1,90	29	1,96
10	2,07	20	1,84	30	2,01

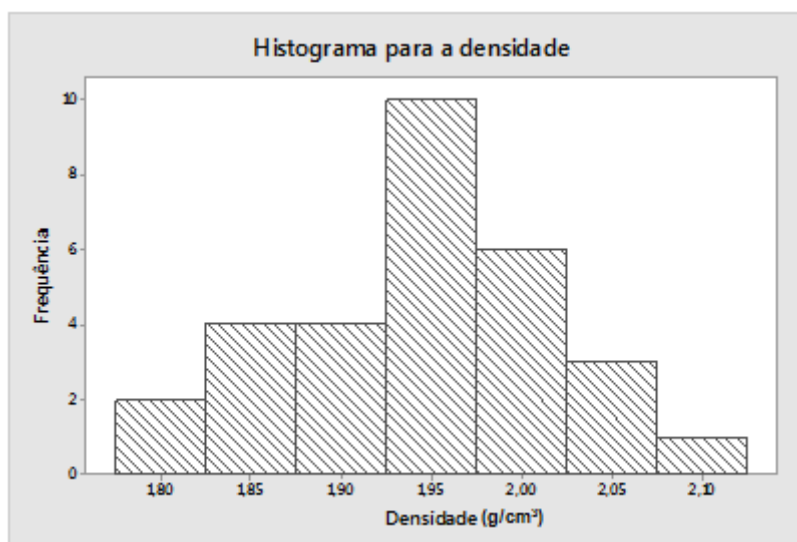


Figura 5.11 – Histograma dos valores de densidade dos blocos dos testes finais.

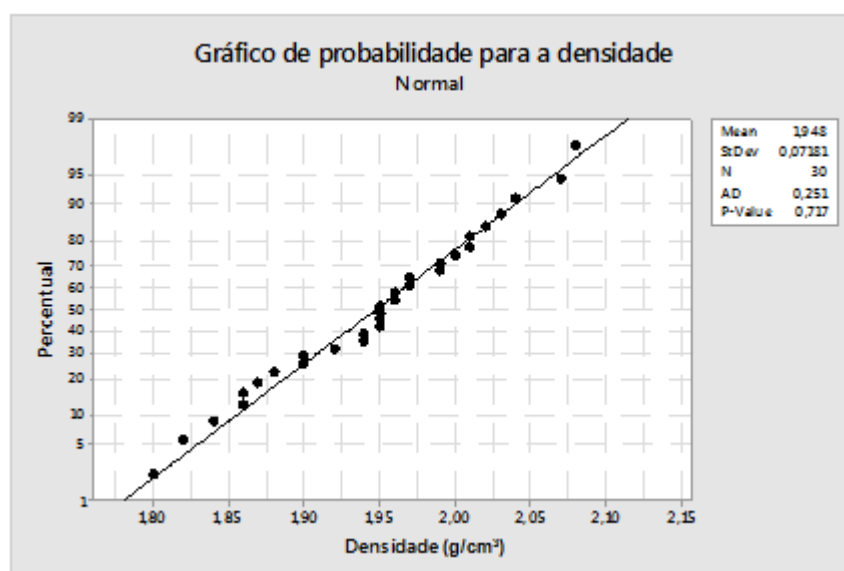


Figura 5.12 – Teste para normalidade para os valores de densidade dos blocos dos testes finais.

5.3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 5.13 exhibe os resultados do ensaio de resistência à compressão para os dois corpos de prova retirados de cada bloco. Foram escolhidos 15 blocos para este ensaio. A Figura 5.13 mostra o teste de normalidade de Anderson-Darling para os valores médios dos corpos de prova de cada bloco, indicando que ela não é estritamente normal, mas, dado o valor de $p = 0,097$, o valor médio e a sua incerteza foram calculadas utilizando o teste t, com

90% de probabilidade. A Figura 5.14 traz o histograma para os valores da resistência à compressão. O valor calculado para a resistência à compressão média foi $11,05 \pm 1,29\text{MPa}$.

Tabela 5.13 – Resultado para o ensaio de resistência à compressão em 15 blocos dos testes finais.

Bloco Nº	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Média (MPa)
1	8,61	10,87	9,74
2	8,15	11,45	9,80
3	12,34	6,45	9,40
4	5,90	7,88	6,89
5	7,81	14,15	10,98
6	12,20	11,99	12,10
7	15,85	12,38	14,12
8	18,89	18,33	18,61
9	8,62	11,60	10,11
10	7,62	6,05	6,84
11	11,86	10,82	11,34
12	12,17	12,69	12,43
13	9,18	12,49	10,84
14	12,35	9,28	10,82
15	10,90	12,54	11,72

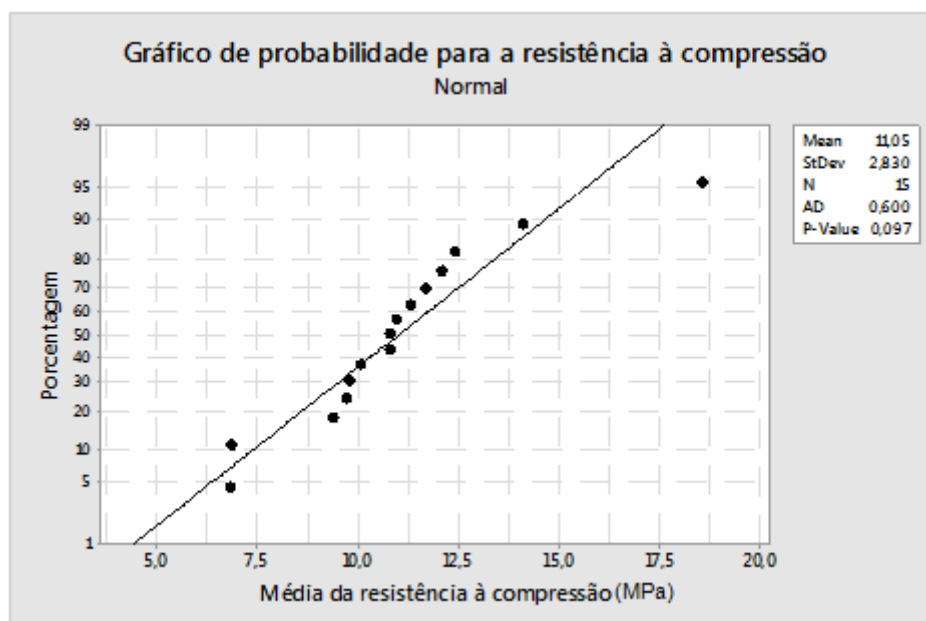


Figura 5.13 – Teste para normalidade para os valores de resistência à compressão dos blocos dos testes finais.

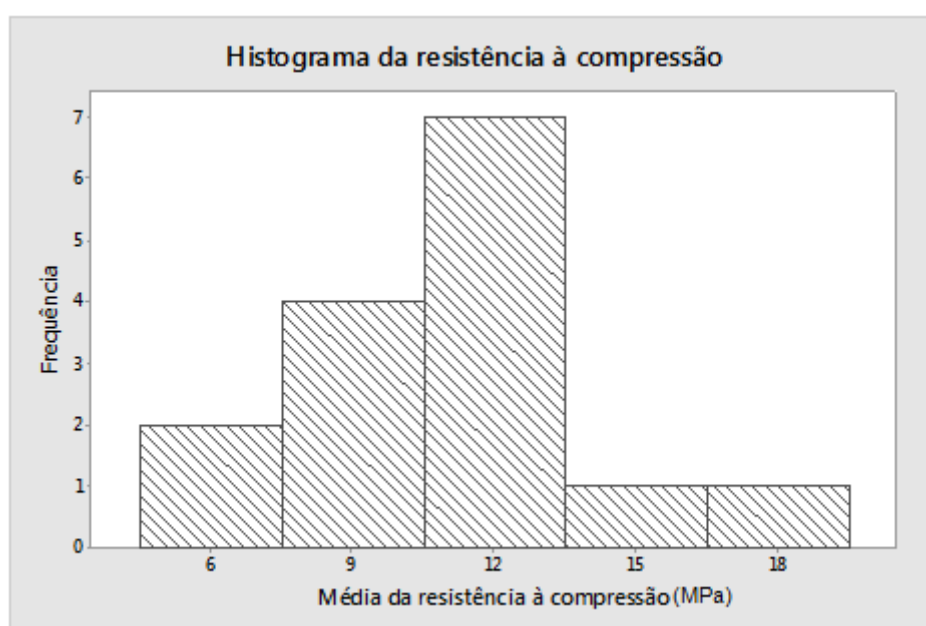


Figura 5.14 – Histograma dos valores de resistência à compressão dos blocos dos testes finais.

5.3.6 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A Tabela 5.14 expõe os resultados do ensaio de resistência à flexão para os blocos testados. Foram escolhidos 15 blocos para este ensaio. A Figura 5.15 apresenta o teste de normalidade de Anderson-Darling para os valores alcançados por cada bloco, indicando que

ela é normal. A Figura 5.16 mostra o histograma dos valores da resistência à flexão. O valor calculado para a resistência média à flexão foi $4,42 \pm 0,69\text{MPa}$.

Tabela 5.14 - Resultado para o ensaio de resistência à flexão (RF) em 15 blocos dos testes finais.

Bloco Nº	RF (MPa)	Bloco Nº	RF (MPa)	Bloco Nº	RF (MPa)
16	5,39	21	5,63	26	3,26
17	7,46	22	5,90	27	2,45
18	5,81	23	4,32	28	2,40
19	4,85	24	4,65	29	2,32
20	5,14	25	3,37	30	3,40

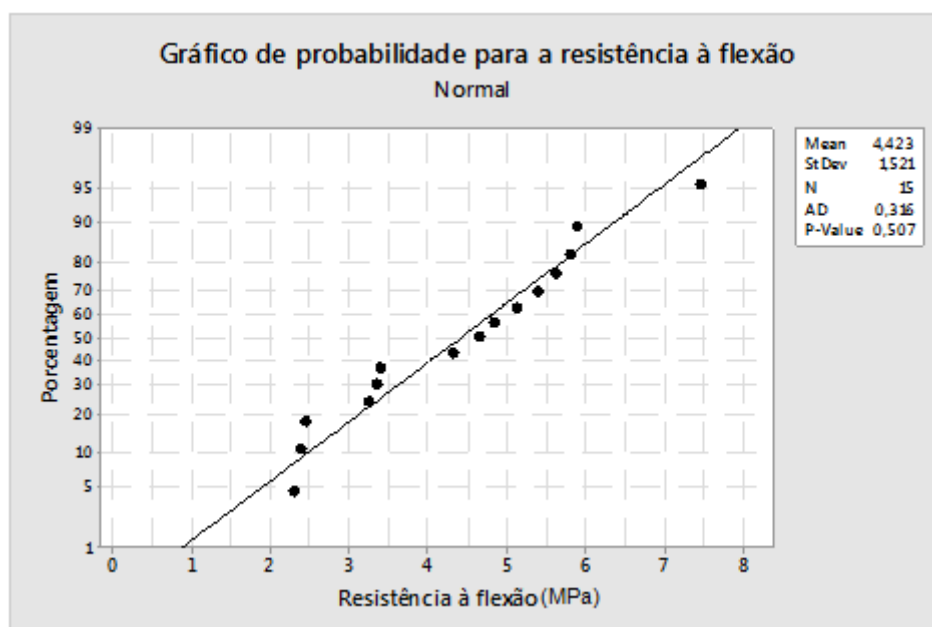


Figura 5.15 – Teste para normalidade para os valores de resistência à flexão dos blocos dos testes finais.



Figura 5.16 – Histograma dos valores de resistência à flexão dos blocos dos testes finais.

5.3.7 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

A Figura 5.17 exibe uma micrografia típica obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da microestrutura dos blocos. Quatro regiões podem ser vistas. De acordo com as medidas feitas por espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS), as regiões de cor branca são hematita, as regiões de cor cinza são quartzo e as regiões de cor cinza escuro são poros, que foram preenchidos com resina durante a preparação ceramográfica da seção transversal da amostra retirada do bloco. Como esperado, uma fase vítrea (composta de Si, O, Fe, Al e Na) se formou em torno das partículas de quartzo promovendo a adesão entre elas.

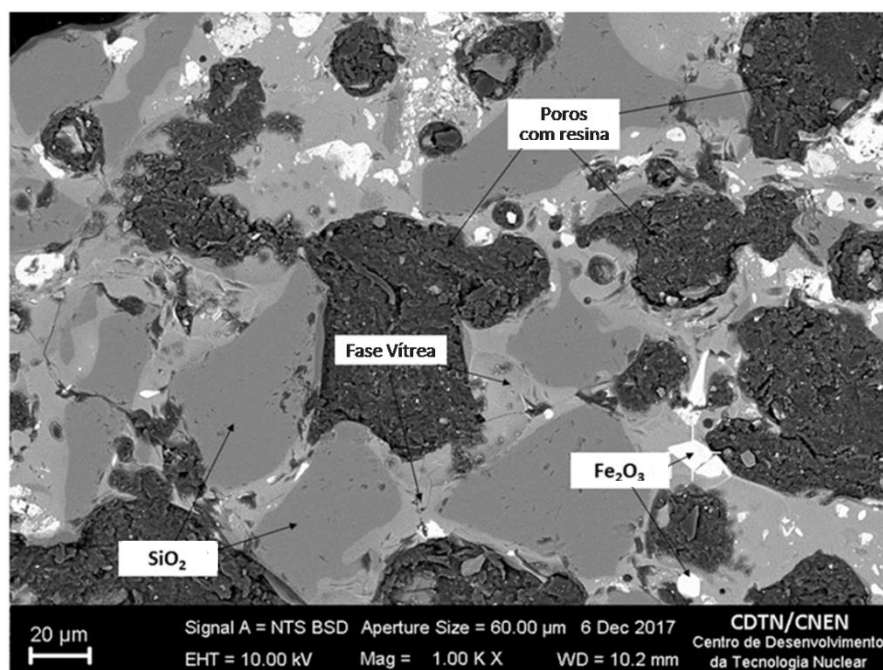


Figura 5.17 – Micrografia MEV de microestrutura típica dos blocos obtidos com o rejeito depositado na Barragem de Candonga.

A Figura 5.18 traz o espectro na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do material coletado da região de manchas brancas dos blocos (eflorescência). Parece ser uma mistura de carbonato de sódio e metasilicato de sódio penta-hidratado. O carbonato de sódio é formado pela exposição de íons de sódio à umidade e CO_2 da atmosfera. O metasilicato de sódio penta-hidrato é formado pela exposição do silicato de sódio à umidade atmosférica.

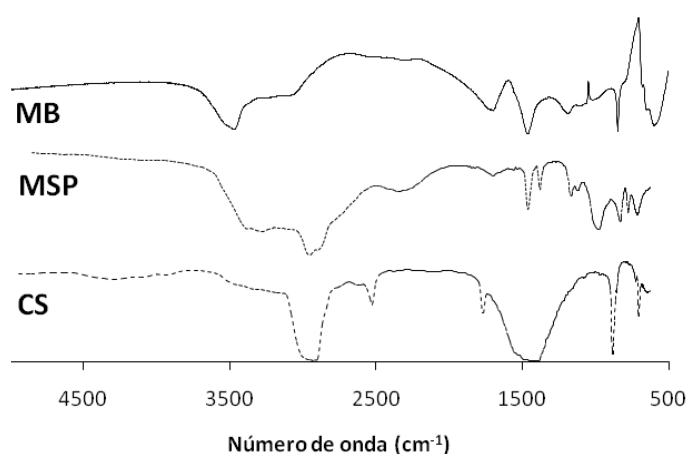


Figura 5.18 – Espectro de FTIR do material das manchas brancas (MB) da superfície dos blocos obtidos com o rejeito depositado na Barragem de Candonga comparado aos do carbonato de sódio (CS) e do metasilicato de sódio penta-hidratado (MSP) da biblioteca do NIST.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os difratogramas de raios X, obtidos nas regiões de borda e centro, totalizando 8 amostras, retiradas de 4 blocos que apresentaram os valores mais baixo e mais elevado nos ensaios, respectivamente, de resistência à compressão e à flexão. Investigou-se assim a possibilidade de a microestrutura exercer influência sobre as características mecânicas dos blocos.

Pode-se observar que nos quatro blocos avaliados, maiores quantidades de quartzo e por consequência, maiores quantidades de fase vítrea, foram encontradas nas amostras retiradas das camadas externas superiores (bordas) desses blocos. Isso mostra que apesar da segregação da fase vítrea na superfície do bloco ter sido atenuada pela adoção de uma temperatura de queima menor (700 °C), esta temperatura não foi suficiente para alcançar uma distribuição homogênea da fase vítrea na estrutura do bloco.

Ao se comparar os blocos com o pior e o melhor resultado para resistência à flexão, observou-se, respectivamente, uma diferença de 4,8% e 2,4% no teor de quartzo entre a região externa superior (borda) e a região interna (centro). Já os blocos testados para resistência à compressão com o pior e o melhor resultado, apresentaram, respectivamente, uma diferença de 13% e 1,8% no teor de quartzo entre a camada externa superior e a camada interna.

Os blocos que obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica apresentaram uma menor quantidade de fase vítrea na região externa superior e maior quantidade na região central quando comparados com os blocos que obtiverem os piores resultados. Tal fato permite inferir que quanto mais o fenômeno de segregação da fase vítrea é atenuado, menor é a diferença entre a quantidade de fase vítrea que se forma no exterior e no interior do bloco, resultando em uma peça mais equilibrada e com melhores propriedades mecânicas.

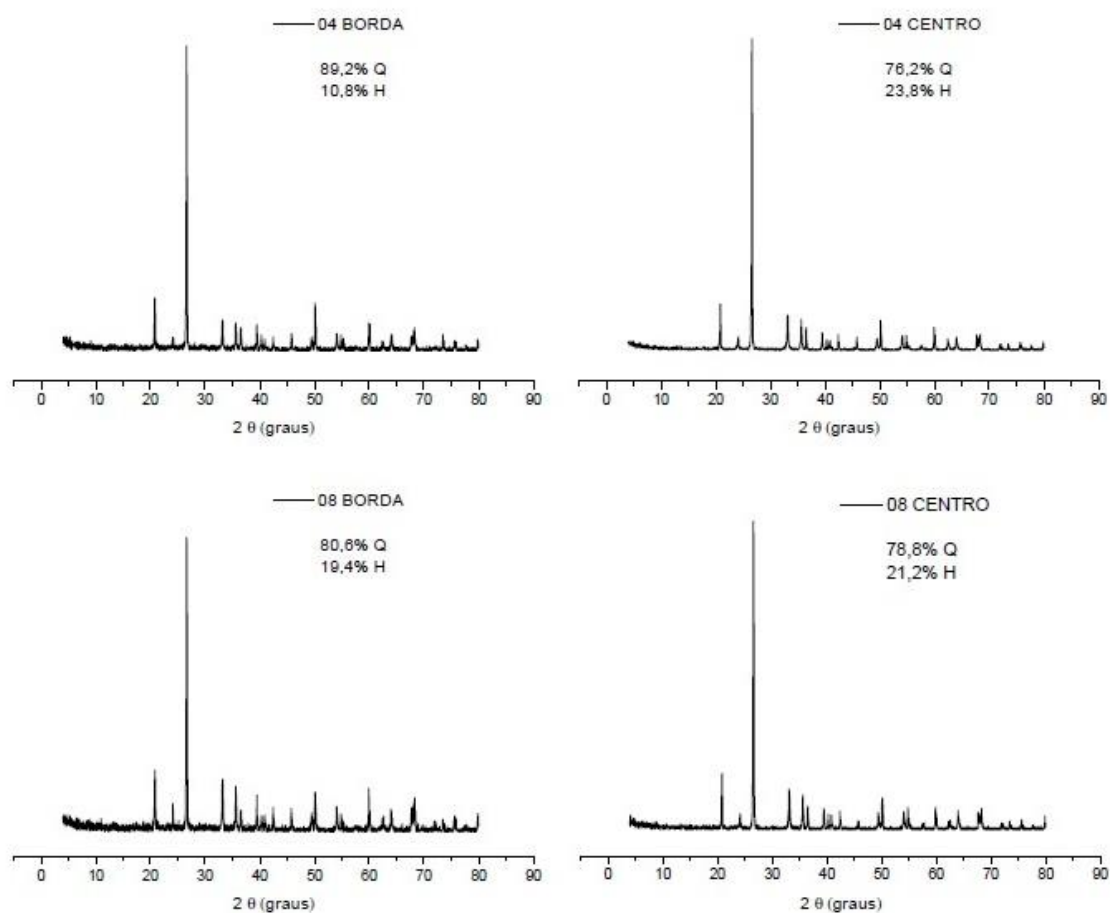


Figura 5.19 – Difractogramas das amostras retiradas dos blocos com pior (bloco de nº04) e melhor (bloco de nº08) resultados nos ensaios de compressão.

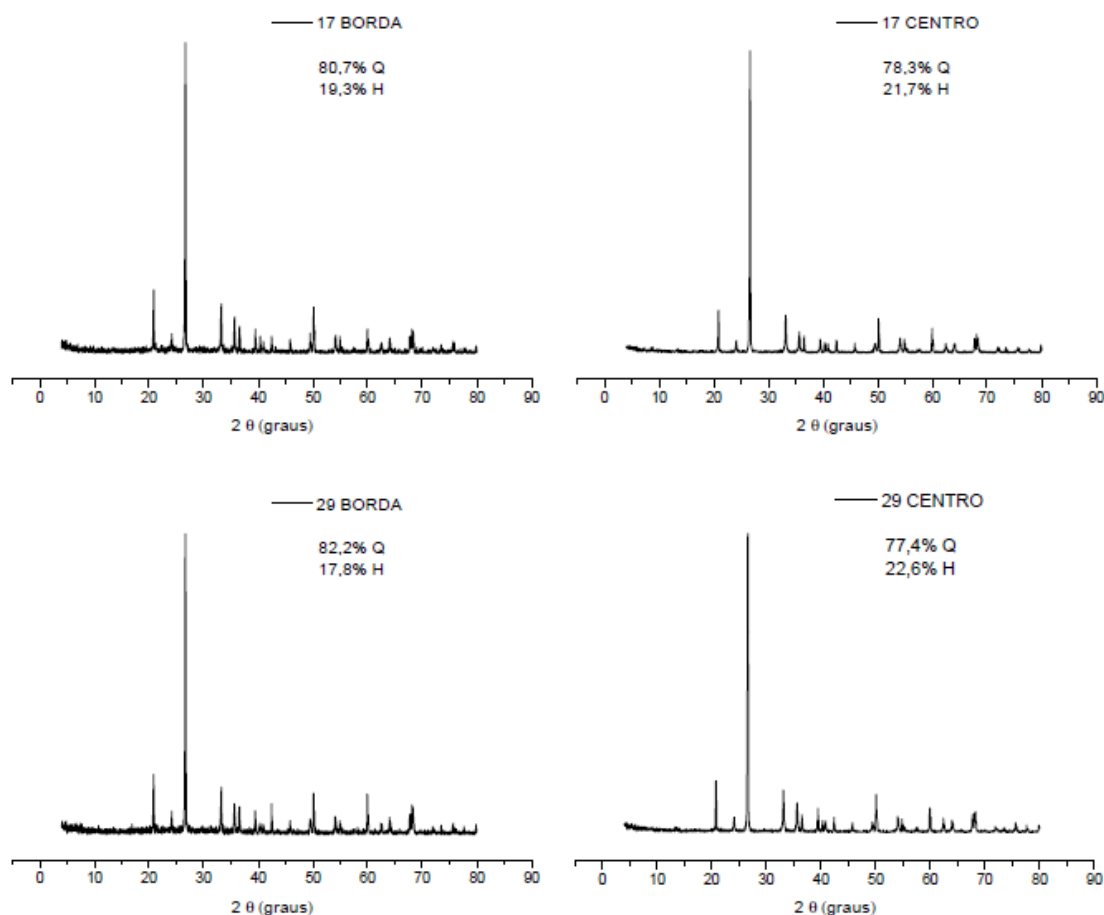


Figura 5.20 – Difratomogramas das amostras retiradas dos blocos com pior (bloco de nº29) e melhor (bloco de nº17) resultados nos ensaios de flexão.

5.4 APLICAÇÕES PARA O PRODUTO OBTIDO COM O REJEITO

Devido às suas características físicas e mecânicas, o produto obtido com rejeito apresenta a possibilidade de ser empregado na construção civil como similar a produtos convencionais disponíveis hoje no mercado, substituindo-os em algumas situações.

Um dos produtos que pode ser substituído é o tijolo cerâmico maciço para alvenaria sem função estrutural. Isso é possível devido ao bloco desenvolvido atender aos requisitos técnicos das normas NBR 7170 (ABNT, 1983a), NBR 6460 (ABNT, 1983b) e NBR 8041 (ABNT, 1983c). O menor valor de resistência à compressão alcançado pelos blocos foi de 5,90MPa, valor bem superior à maior resistência prevista pela NBR 7170 (ABNT, 1983a) para tijolos comuns da categoria C (4MPa). O maior valor e o valor médio de resistência à compressão obtidos pelos blocos foram respectivamente, de 18,89MPa e de 11.05 ± 1.29 MPa.

A NBR 7170 (ABNT, 1983a) prevê, ainda, que tijolos especiais podem ser fabricados em formatos e especificações acordadas entre fabricantes e clientes. As peças desenvolvidas neste trabalho se enquadrariam na condição de tijolos especiais, por possuírem largura e altura menores que os tijolos comuns.

Os ladrilhos hidráulicos utilizados como pisos de sinalização tátil também podem ser substituídos pelo produto desenvolvido com o rejeito depositado na Barragem de Candonga. A NBR 9457 (ABNT, 2013) recomenda que ladrilhos hidráulicos devam possuir resistência à flexão maior ou igual a 3,5MPa em ensaio realizado de acordo com os procedimentos propostos pela NBR 13818 (ABNT, 1997). Os blocos desenvolvidos neste trabalho mostraram uma resistência à flexão média de $4,42 \pm 0,69$ MPa. Das quinze amostras ensaiadas, nove corpos de prova apresentaram valores individuais muito acima do estabelecido, porém, os corpos de prova de números 25, 26, 27, 28, 29 e 30 (Tabela 5.14, página 61) apresentaram valores individuais abaixo do recomendado.

A densidade das amostras produzidas alcançou o valor médio de $1,95 \pm 0,03$ g/cm³, destaca-se uma aproximação aos valores apresentados por tijolos cerâmicos maciços convencionais que variam de 1,8g/cm³ a 2g/cm³. Uma baixa densidade é importante nos materiais de revestimento para a construção civil devido à necessidade de transporte, normalmente rodoviário, do local de fabricação até o canteiro de obras. Um produto que possui baixa densidade é interessante na medida em que representa economia de combustível ao permitir que um maior número de peças seja transportado em uma mesma viagem.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios realizados, conclui-se que o objetivo de desenvolver um produto com boas propriedades a partir do rejeito de mineração da Barragem de Fundão depositado na Barragem de Candonga que pode ser empregado na construção civil, como tijolo cerâmico maciço para alvenaria e ladrilho hidráulico, foi alcançado.

O rejeito depositado na Barragem de Candonga é composto por partículas maiores constituídas de quartzo e partículas menores que são constituídas de óxidos de ferro e argilas. Sua distribuição granulométrica é mais fina do que as faixas especificadas para a areia a ser utilizada em produtos de cimento Portland. É também mais fina que o rejeito arenoso.

Para produzir um bloco monolítico, foi utilizado um fundente dissolvido em água para quartzo. Durante o aquecimento, as partículas de quartzo sofrem fusão parcial e aderem umas às outras. Com o resfriamento, obtém-se uma fase vítrea que une as partículas de quartzo, formando uma estrutura rígida. As partículas de óxido de ferro e argila também são aderidas a esta fase vítrea.

Por meio de estudos preliminares e do planejamento de experimentos foi possível investigar a influência dos fatores na obtenção dos blocos. A pressão de 2,4MPa produziu blocos com superfície uniforme na inspeção visual. O planejamento fatorial 2^3 , com 90% de confiança, demonstrou que o teor de carbonato de sódio diminui a absorção de água, não tem efeito significativo sobre a densidade e aumenta a resistência à compressão. O aumento do teor de água diminui a absorção de água, aumenta a densidade e não tem efeito significativo sobre a resistência à compressão. A temperatura não tem efeito significativo na absorção de água, densidade e resistência à compressão. A interação entre o teor de carbonato de sódio e água é significativa para a absorção de água. A interação entre o teor de carbonato de sódio e a temperatura não tem significância, bem como a interação entre o teor de água e a temperatura. A interação dos três fatores só pôde ser calculada para a absorção de água e não é significativa.

Blocos nas condições otimizadas puderam ser obtidos a partir da adição de 5% de carbonato de sódio e 13% de água ao rejeito seco, com sua mistura até formação de uma massa homogênea, prensagem e aquecimento a 700°C ao ar. Uma matriz vítrea se formou em torno das partículas de quartzo proporcionando resistência mecânica suficiente ao produto tornando-o adequado para ser usado na construção civil. A matéria orgânica residual foi queimada durante o aquecimento. A absorção de água está na faixa de 12-16%, a perda de massa dos blocos na água não foi significativa, a densidade foi de $1,95 \pm 0,03\text{g/cm}^3$, a

resistência à compressão foi de $11,05 \pm 1,29\text{MPa}$, e a resistência à flexão foi de $4,42 \pm 0,69\text{MPa}$. Pequenas trincas e poros, além do crescimento de manchas brancas (eflorescência) foram observados na superfície dos blocos. A melhoria dos processos de moldagem, prensagem e desmoldagem, assim como o ajuste do programa de tratamento térmico podem evitar ou atenuar esses defeitos.

A implantação de testes em escala piloto e a elaboração de um plano de negócios são etapas futuras necessárias para viabilizar a comercialização do produto desenvolvido.

Para uma correta avaliação e controle de qualidade do produto obtido com o rejeito de mineração, a atualização das normas técnicas existentes e o detalhamento de métodos de ensaios específicos são de fundamental importância, pois alguns métodos de avaliação para produtos convencionais não possibilitam uma boa avaliação dos produtos fabricados a partir de rejeitos da mineração.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a influência dos processos de moldagem, prensagem, desmoldagem e do programa de tratamento térmico no aparecimento de trincas, poros e crescimento de manchas brancas (eflorescência);
- Modificar processo de obtenção para corrigir problemas de desmoldagem para testar peças produzidas com nível de 15% de umidade em relação à absorção de água, perda de massa após imersão em água, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão e microestrutura;
- Testar peças produzidas em máquina semi-automática, projetada e fabricada durante a execução do presente trabalho, em relação à absorção de água, perda de massa após imersão em água, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão e microestrutura para comparação aos resultados alcançados em escala de bancada;
- Realizar caracterização aprofundada para usos específicos dos blocos produzidos com rejeito como placas de revestimento;
- Implantar produção em escala piloto de blocos com rejeito. Fazer testes estatísticos comparativos das respostas obtidas com aquelas dos blocos produzidos em laboratório;
- Desenvolver processo produtivo compatível com escala industrial;
- Realizar testes de assentamento dos produtos com rejeito, em concordância com as normas técnicas vigentes para produtos similares convencionais;
- Executar estudos de viabilidade econômica e elaborar plano de negócios para produção e comercialização em escala industrial do bloco com rejeito como produto similar ao tijolo maciço para alvenaria e ladrilho hidráulico;
- Realizar estudos de inserção de matriz geopolimérica na produção de blocos com rejeito da Barragem de Fundão depositado na Barragem de Candonga como forma de melhorar o desempenho dos blocos obtidos, permitindo outras aplicações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Manual de Ladrilho Hidráulico: Passeio Público*. São Paulo: ABCP, 2010. 28p. Disponível em: <<http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/08/ManualLadrilhoHidraulico.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9457: Ladrilho hidráulico - Especificação*. Rio de Janeiro, 1986. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9457: Ladrilhos hidráulicos para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2013. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7170:1983 Tijolo maciço cerâmico para alvenaria*. Rio de Janeiro, 1983a. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6460:1983 Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Verificação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1983b. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8041:1983 Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Forma e dimensões – Padronização*. Rio de Janeiro, 1983c. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13818:1997 Placas Cerâmicas Para Revestimento - Especificação e Métodos de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1997. 78 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. *Anuário da Indústria Química Brasileira*. São Paulo: ABIQUIM, 2000, ano 27, p. 277.

BASTOS, Lucas Augusto de Castro. *Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro como Matéria Prima para Infraestrutura Rodoviária*. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Dissertacao_Lucas.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2017.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Seção 1. p. 3. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 23 jan. 2018.

CALLISTER, W.D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002. 704 p.

FONTES, Wanna Carvalho. *Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Dissertacao_Wanna.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2017.

FONTES, Wanna Carvalho; COSTA, Ellen Cristine Pinto da; MATIAS, Ana Carolina de Paula; FIGUEIREDO, Aline Santana; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Revestimentos Hidráulicos de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017. 10 p. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Wanna_Revestimentos.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.

FRANCO, Luiza Carvalho; SANTOS, Diego Haltiery dos; ROSA, Paula Ponciano Gomes; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; PEIXOTO, Ricardo Fiorotti. Aplicação de Rejeito de Mineração como Agregado para a Produção de Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal: IBRACON, 2014. 15 p. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/artigo_Ibracon_Luiza_R5.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2017.

FREIRE, A.S.; MOTTA, J.F. *Potencialidades para aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito*. Rochas de Qualidade, São Paulo, v.16, n.123, p.98-108, 1995.

FREIRE, Carolina Braccini. *Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados*. 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <<http://www.redemat.ufop.br/arquivos/teses/2012/UtilizacaoResiduos.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais - ano 2016 / Fundação Estadual do Meio Ambiente*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2017. 47 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/2017/RESIDUO_MINERA%C3%87%C3%83O/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2016.pdf>. Acesso em: 20dez. 2017.

FUNDAÇÃO RENOVA. *Relato de Atividades 2016*. Belo Horizonte: Fundação Renova, 2017a. 69 p. Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/wp-content/themes/fundacao-2016/arquivos/relatorioatividades.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

FUNDAÇÃO RENOVA. *Relatório Mensal de Atividades – Novembro/ 2017*. Belo Horizonte: Fundação Renova, 2017b. 220 p. Disponível em: <http://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/12/relatorio-mensal-de-atividades_novembro_v02.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2018.

GALVÃO, José Lucas Barros; MATIAS, Ana Carolina de Paula; CARMO E SILVA, Keoma Defáveri do; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; MENDES, Júlia Castro. Tintas Imobiliárias Sustentáveis baseadas em Rejeito de Barragem de Minério de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017. 15 p. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Julia_Tintas3.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.

MARQUES, Jonathan de Souza. *Estudo do processo de produção de ladrilhos hidráulicos visando à incorporação de resíduos sólidos*. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012. Disponível em: <<http://www.uel.br/pos/enges/portal/pages/arquivos/dissertacao/81.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

MELO, V.A.R. *Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland*. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2819/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_%20Utiliza%C3%A7%C3%A3oRes%C3%ADuoGerado.PDF>. Acesso em: 23 jan. 2017.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. *O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 303-313, 2002.

NEVES, G.A.; PATRÍCO, S.M.R.; FERREIRA, H.C. *Utilização de resíduos da serragem de granito para confecção de tijolos cerâmicos*. Interação, Campina Grande, v.1, p.3-8, 2000.

PEREIRA JÚNIOR, S. S. *Desenvolvimento de argamassas contendo resíduos arenosos de mineração e estudos de suas propriedades visando sua utilização*. 2011. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.bdtcdn.br/tde_arquivos/1/TDE-2011-07-28T120827Z-104/Publico/Dissertacao%20SchubertSoaresPereiraJr.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2017.

RAIGÓN, P.M.; GARCIA, R.G.; SÁNCHEZ, S.P.J. *Characterization of waste washing solid product of mining granitic tin-bearing sands and its application as ceramic raw material*. Resources, Conservation and Recycling, Amsterdam, v.17, n.2, p.109-124, 1996.

SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery de. *Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego*. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/DissertacaoJoaquim.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017

SILVA, Glaucia Danielle Leirose da. *Estudo da obtenção e caracterização de pedra composta*. 2013. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <<http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2013/EstudoObtencao.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. *A review on the viable technology for construction waste recycling*. Resources, Conservation and Recycling, Amsterdam, v. 47, n.3, p. 209-221, 2006.

TAVARES, Paulo Henrique Campos Prado. *Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito*. 2012. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

Disponível em:
<http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3576/1/TESE_Obten%C3%A7%C3%A3oPigmentos%C3%93xido.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2017.

TOFFOLO, Rodrigo Vicente Machado; SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery de; BATISTA, Júnio Oliveira dos Santos; SILVA, Sidney Nicodemos da; CURY, Alexandre Abrahão; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal: IBRACON, 2014. 14 p. Disponível em:
<http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/Ibracon_Toffolo.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2014.

VERSIEUX, J. L. *Obtenção de blocos de concreto para pavimentação com resíduos da extração do itabirito*. 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) - CDTN/CNEN, Belo Horizonte, 2015.

VIEIRA, M.T.; CATARINO, L.; OLIVEIRA, M.; SOUZA, J.; TORRALBA, J.M.; CAMBRONERO, L.E.G.; MESONES, F.L.G.; VICTORIA, A. *Optimization of the sintering process of raw materials wastes*. Journal of Materials Processing Technology, Lausanne, v.92, n.93, p.97-101, 1999.

ZUCCHERATTE, Ana Cristina Vieira; FREIRE, Carolina Braccini; LAMEIRAS, Fernando Soares. *Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethyltherephtalate*. Construction and Building Materials, Oxford, v. 151, outubro 2017, p. 859-865.

Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817312758?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 fev. 2017.